



MAALÄMPÖPUMPUN COP-ARVON SELVITTÄMINEN JA OPPIMISTEH- TÄVIEN IDEOINTI.

**CASE: TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULUN
OPI ENEMPI -OPPIMISYMPÄRISTÖ**

Jari Hokka

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2012
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumis-
vaihtoehto
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

HOKKA JARI:

Maalämpöpumpun COP-arvon selvittäminen ja oppimistehtävien ideointi. Case: Tampereen ammattikorkeakoulun OPI ENEMPI -oppimisympäristö

Opinnäytetyö 54 sivua, josta liitteitä 4 sivua
Maaliskuu 2012

Sähköisen talotekniikan opiskelumahdollisuuksia lisätään Suomessa voimakkaasti eri opintoasteissa. Syynä on niin yleinen sähköisen tekniikan lisääntyminen rakentamisessa kuin pula osaajista. Energiatohokkuustavoitteet Suomessa ja maailmalla kasvattavat kysyntää uusiutuvia energianlähteitä hyödyntäviä lämmitysjärjestelmiä kohtaan.

Maalämpöpumppujen kasvupotentiaali on arvioitu varsin suureksi. Öljylämmityksen varassa olevat mieltävät keinoja siirtää energian hinnan nousuista riippumattomampaan lämmitysmuotoon. Uudisrakentamisessa rakentamismääräykset ohjaavat pois suorasta sähkölämmityksestä kohti energiaomavaraisempia lämmittämistapoja. Kuluttajat kaipaavat puolueetonta tietoa ja neuvontaa erilaisista ratkaisuista ja niiden hyödyistä.

TAMKin energia- ja ympäristötekniikan OPI ENEMPI -oppimisympäristöön on asennettu maalämpöpumppujärjestelmä, jonka avulla opetetaan tuleville insinööreille kylmätekniikkaa ja lämpöpumppujen toimintaa. Lämpöpumpun tekemiseen on tarvittu monipuolista mekaanista, sähköistä ja tietoteknistä osaamista, jota voivat opiskella niin rakennus-, LVI- kuin sähköisen talotekniikankin opiskelijat.

Lämpöpumpuissa on COP-arvo yksi merkittävimmistä kriteereistä arvioitaessa sen hyvyttä tai taloudellisuutta. Työssäni olen selvittänyt COP-arvon laskemisen mahdollisuuksia oppimisympäristössä olemassa olevilla mittausjärjestelyillä sekä erillisin manuaalisin mittauksin. Lämpökerroin on selkeästi määritelty fysiikassa, mutta sen todellinen ja tarkka mittaaminen ja laskenta on vaikeaa.

Sähkötekniikan opiskelijoita kiinnostaa lämpökertoimeen suoraan vaikuttavan kompressorin sähkönkulutuksen merkitys. Tulevaisuuden älykkäässä sähköverkossa on uusia haasteita, kun lämpöpumppujen määrä kasvaa ja kovimpien pakkashuippujen aikainen lämmitystarve kasvaa. Miten mahdollinen sähkönhinnan porrastus tulee vaikuttamaan lämpöpumppulämmittäjiin? Sen näemme aikanaan.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in electric power engineering

HOKKA JARI

Defining and Composing Exercises of the COP Value of a Geothermal Heat Pump.
Case: OPI ENEMPI Learning Environment of Tampere University of Applied Sciences

Bachelor's thesis 54 pages, appendices 4 pages
March 2012

Studying opportunities of electrical building technologies have been increased sharply in all degree levels in Finland. The reason for this is both a general increase of electronic technology in construction as well as the shortage of skilled employees. Energy efficiency targets in Finland and around the world will increase the demand for renewable energy heating systems.

The growth potential of geothermal heat pumps is estimated to be very high. Those dependent on oil heating systems are thinking of ways to move to more independent forms of heating, not so dependent on price increases. In new construction, building codes are leading away from direct electric heating and towards energy self-sufficient ways of heating. Consumers need neutral information and advice on various solutions and their benefits.

A geothermal heat-pump system has been installed at TAMK's energy and environmental technology based OPI ENEMPI -learning environment. This helps to teach future engineers refrigeration technology and heat pumps in operation. Heat pumps contain versatile mechanical, electronic and information technology, which can be studied by the construction, HVAC and electrical engineering students.

A COP value is one of the main criteria for assessing the efficiency or economy of heat pumps. In my study I have investigated different methods of the COP calculation in the learning environment with the existing metering arrangements and separate manual measurements. We note that the concept of the heat factor is clearly defined in physics, but the true, and accurate measurement and calculation of it is difficult.

Electrical engineering students are interested in the compressor power consumption, which directly affects the heat factor. The future of the smart electricity grid is facing new challenges, when the number of heat pumps is growing and the total need of heating is at its highest level. How will the possible future fluctuation in electricity prices affect those heating with heat pumps? This is something we will see in the near future.

Key words: ground heat pump, COP value, smart grid

SISÄLLYS

LYHENTEET JA TERMIT	5
1 JOHDANTO.....	6
2 UUSIUTUVAT ENERGIAAT JA MAALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	8
2.1 Uusiutuvat energiat ja EU:n tavoitteet.....	9
2.2 Rakennusten lämmittäminen uusiutuvalla energialla	11
2.3 Maaperään varastoitunut lämpö.....	13
3 MAALÄMPÖPUMPPU	15
3.1 Lämpöpumppujen historia	15
3.2 Fysikaaliset perusteet	16
3.3 Toimintaperiaatteet ja komponentit	17
3.4 Lämpökerroin.....	18
3.5 Osateho vai täystehopumppu ?	18
3.6 Porauksen syvyys ja teoreettinen teho	20
4 COP-ARVOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT JA SEN LASKEMINEN	23
4.1 Fysikaaliset suureet ja teoria	23
4.2 Ulkopuolinen (sähkö)energia.....	27
4.3 Laskeminen toteutuneen kulutuksen avulla: esimerkkinä omakotitalo Hartman	28
4.4 Teoreettinen ja käytännön laskeminen oppimisympäristössä.....	29
5 TAMKIN OPPIMISYMPÄRISTÖ	30
5.1 Oppimisympäristön laitteet	30
5.2 Mittaaminen oppimisympäristössä	36
5.3 Laskeminen kylmähöyryprosessista	36
5.4 Laskeminen muilla mittauksilla.....	38
5.5 Harjoitustehtäväehdotukset opiskelijoille.....	40
6 TULOKSET	43
6.1 TAMKin maalämpöpumpun COP-arvo.....	43
6.2 Oppimisympäristön käyttö opiskelijoiden harjoituksiin.....	43
6.3 Huomioita maalämpöpumppujen COP-arvoista	44
6.4 Maalämpöpumppujen vaikutus sähkönkulutukseen valtakunnallisesti	45
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA LOPPUYHTEENVETO	47
LÄHTEET.....	49
LIITTEET.....	51
Liite 1. p,h-diagrammi.....	51
Liite 2. Kompressorin tehonkulutuksen mittaust.....	52
Liite 3. Harjoitustehtäväehdotukset opiskelijoille.....	53

LYHENTEET JA TERMIT

c_{liuos}	Liuoksen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
c_p	Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
c_v	Tilavuuslämpökapasiteetti [kWh/m ³ K]
h	Entalpia [kJ/kg]
h_h	Entalpian kasvu höyrystimessä [kJ/kg]
h_K	Entalpian kasvu kompressorissa [kJ/kg]
Δh_L	Entalpian muutos lauhduttimessa [kJ/kg]
m	Massa [kg]
P	Kompressorin sähköteho [W]
P_k	Kompressorin teho [W]
P_{kok}	Lämpöpumpun kuluttama teho [kW]
P_a	Kompressorin apulaitteiden teho [W]
Q	Lämpösisältö, entalpia [J]
q_m	Massavirta [kg/s]
q_v	Tilavuusvirta [m ³ /s]
q_{vg}	Kompressorin geometrinen tilavuusvirta [m ³ /s]
t	Aika [s]
T	Lämpötila [°C tai]
T_A	Ilman keskilämpötila [°C tai K]
T_0	Maanpinnan keskilämpötila [°C tai K]
V	Tilavuus [m ³]
W_{kok}	Lämpöpumpun käyttämä sähköenergia [kWh]
ε	Jäähdytyskoneen kylmäkerroin
ε_L	Lämpöpumpun lämpökerroin
ε_{CK}	Carnot-lämpöpumpun lämpökerroin
η_s	Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde
η_{sm}	Kompressorin sähkömoottorin hyötysuhde
λ	Tuottosuhde, kompressorin kaikki häviöt huomioiva hyötysuhde
Φ_{hs}	Kompressorissa hyödyksi saatu lämpöteho [W]
Φ_o	Prosessin höyrystinteho [kW]
φ	Lämpökerroin, josta käytetään myös lyhennettä COP
φ_{vuosi}	Lämmityksen vuosilämpökerroin, myös SPF

1 JOHDANTO

Energian saatavuudesta on yhdessä luonnonvarojen käytön kanssa muodostunut yksi suurista haasteista maailmanlaajuisesti väestömäärän ja talouden jatkaessa kasvuaan. Pelko ilmastonmuutoksesta on saanut meidät myös toteuttamaan monia toimenpiteitä, joilla voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Tässä periaatteessa on kysymys vain kulutuksen hillitsemisestä, mutta kun keinot, joilla poliitikot uskaltavat kulutukseen puuttua, ovat rajalliset, on yhtenä keinona noussut esille uusiutuvan energian käyttö. Fossiilisten polttoaineiden riittävydestä ollaan montaa mieltä; pessimistisimpien väittäessä ns. peak oilin eli öljyntuotannon huippuvuoden olleen jo ohi. Sähkön käyttö kuitenkin näyttää jatkavan nousuaan varsinkin kehittyvissä maissa, missä kulutuksen lähtötaso on alhainen (Laatikainen, 2011).

Suomessa energian käyttö karkeasti voidaan jakaa teollisuuteen, liikenteeseen, palveluihin ja rakennuksiin. Rakentamisen ja rakennusten osuus on kokonaisenergiankulutuksesta 30 – 43 %. Tämä on yhdessä muiden Pohjoismaiden ja Kanadan kanssa yksi suurimmista kehittyneissä maissa. Omakotitaloissa kotitaloussähkön, lämpimän käyttöveden ja lämmityksen osuus kaikista asumiskuluista on suurin. 70-luvulla yleistyneen suoran ja varaavan sähkölämmityksen jäljiltä meillä on edelleen yli 600000 sähkölämmityksen varassa olevaa omakotitaloa. Öljylämmitteisiä omakotitaloja on yli 200000. Julkiset rakennukset ja asuinkerrostalot usein ovat kaukolämmityksen piirissä. Koko rakennuskantaan tällä hetkellä mietitään keinoja parantaa energiatehokkuutta.

Euroopassa ollaan siirtymässä kovaa vauhtia kohti älykästä sähköverkkoa, jossa nykyisiä verkkoja täydennetään tietoliikenneverkolla ja älykkäällä energiankäytön seurannalla. Älykäs sähköverkko on edellytys EU:n ympäristötavoitteiden toteutumiselle. Älykäs sähköverkko tukee myös komission sähkömarkkinoiden integraatiolle, kilpailukyvyille ja toimitusvarmuudelle asettamia tavoitteita. Älykkään sähköverkon odotetaan lisäävän kansalaisten hyvinvointia ja luovan paljon uusia työpaikkoja. Älykäs sähköverkko auttaa kansalaisia tehostamaan energiankäyttöään, samalla kun se mahdollistaa kysyntäjoustot. Pienimuotoisen, erityisesti kiinteistökohtaisen, mikrotuotannon lisääntyminen muuttaa verkon käyttötapoja. Tämä ei ole mahdollista ilman, että verkon älykkyyttä lisätään (Energiateollisuus ry, 2012).

Lämpöpumpputekniikka on periaatteiltaan tunnettu jo 1800-luvulta. Kuitenkin vasta viimeisen parin kymmenen vuoden aikana siitä on noussut varsinainen teollisuuden ala. Tämän on mahdollistanut niin lisääntynyt kysyntä, kuin myös komponenttien kehittyminen ja ohjaustekniikoiden sulautuminen osaksi mekaanisia ratkaisuja. Lämpöpumpun COP-arvo eli lämpökerroin, joka kertoo sen tuottaman ilmaisenergian suhteessa käytettyyn sähköenergiaan, on parantunut huomattavasti. Näin lämpöpumpuista on vähitellen tullut kilpailukykyisiä lämmönlähteitä rakennuksissa, kun energian hinta on noussut vuosi vuodelta.

Sähköverkkoyhtiöitä huolestuttaa, että lisääntyvä lämpöpumppujen sähkön kulutus vaikuttaa sähkön tuotantoon ja sen ennustettavuuteen. Ennusteiden mukainen lämpöpumpumäärä Suomessa saattaa jopa pienentää sähköverkkoliiketoimintaa (Tuunanen 2009, 116).

Tampereen ammattikorkeakoulun Kuntokadun kampukselle on rakennettu energia- ja ympäristötekniikan oppimisympäristö EAKR-rahoitteisessa hankkeessa OPI ENEMPI. TAMKin Kuntokadun I-talon remontin yhteydessä rakennettuihin uusiin laboratoriotiloihin saneerattiin oppimisympäristö, jonka tavoitteena on kouluttaa TAMKin tekniikan koulutusohjelmissa monialaisia uuden energia- ja jätevesiteknologian osaajia yrityksille ja kunnille. Oppimisympäristö sisältää maalämpöjärjestelmän, kaksi erilaista tuulivoimaa sähkön tuotantoon, aurinkojärjestelmää sekä niiden monitorointi- ja seurantajärjestelmät.

Työssäni perehdyn oppimisympäristössä olevaan maalämpöpumppujärjestelmään ja määrittelen sen avulla COP-arvon laskentaan liittyviä tekijöitä kaupallisen laitteen ollessa kyseessä. Samalla teen tulevien opiskelijoiden käyttöön oppimisympäristöä hyväksi käytäviä harjoitustehtäviä, joissa painopisteenä ovat COP-arvo ja monitorointi- ja mittausjärjestelmistä sekä manuaalisesti saatavat mittaustiedot. Tavoitteena tässä työssä on myös tuoda esille lämpöpumppujen käyttämän sähköenergian osuus, ja jopa arvioida sen vaikutuksia Suomen sähköenergian kokonaiskulutukseen.

2 UUSIUTUVAT ENERGIAT JA MAALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

Ihmiskunnan energiahuolto perustuu uusiutumattomiin energialähteisiin, joita ovat pääasiassa fossiiliset polttoaineet sekä ydinvoiman polttoaine uraani. Energiavarantojen riittävyyttä on selvittänyt Saksan liittovaltion raaka-ainevirasto, joka keräsi tiedot eri valtioiden ja yritysten tilastoista ja tutkimuksista vuodelta 2007.

TAULUKKO 1. Fossiilisten energialähteiden riittävyys miljooniksi öljytonneiksi muutettuna (Ökotest-lehti, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2011)

Raaka-aine	Tuotanto 2007	Tunnetut varannot	Riittävyys	Todennäköiset varannot
Öljy	3782	163529	43 vuotta	82056
Öljyhiikka	100	65000	650 vuotta	66000
Maakaasu	2738	166046	61 vuotta	187789
Kivihiili	3241	421281	130 vuotta	8762957
Ruskohiili	231	76755	332 vuotta	1185198
Uraani	404	32715	81 vuotta	20880

Fossiilisten polttoaineiden käyttö vapauttaa ilmakehään niihin muuten pysyvästi varastoituneita haitallisia kaasuja, jotka voimistavat kasvihuoneilmiötä ja ilmastonmuutosta. Lisäksi ne happamoittavat maaperää ja vesistöjä. IEA (international Energy Agency) varoittaa, että jos fossiilisten polttoaineiden käyttö ei viidessä vuodessa käänny laskuun, on ihmiskunta peruuttamattomasti menettänyt mahdollisuutensa vaikuttaa ilmastonmuutokseen (The Guardian, 2011).

Uusiutuvat energialähteet ovat vallanneet yhä enemmän jalansijaa uusiutumattomilta energianlähteiltä. Nykyisin uusiutuvat energianlähteet kattavat noin 10 % energiantuotannosta. Niistä vesivoima ja biopolttoaineet kuten puu ovat merkittävimmät. Uusiutuvaksi energiaksi katsotaan vesi- ja tuulivoima, aurinkoenergia, bioenergia, sekä lämpöpumppujen ympäristöstään hyödyntämä ilmaislämpö. Esimerkiksi puun polttamisen ei katsota lisäävän kasvihuoneilmiötä, koska sama määrä hiilidioksidia vapautuisi ilmakehään myös puun lahotessa. Aurinko- ja tuulivoima ovat energianlähteitä, joita riittää käytännössä rajattomasti. Näiden kohdalla haasteena on teknis-kaupallisesti kannattavi-

en hyödyntämistapojen kehittäminen. Tällä hetkellä erilaisia teknologioita kehitetään maailmanlaajuisesti.

Suomessa on perinteisesti biopolttoaineiden osuus ollut suuri. Syynä on teollisuuden tuotannosta riippuvien polttoaineiden, eli erilaisten jäteliemien ja tähdepuun iso osuus.



KUVA 1. Energian loppukulutus 2010 (Energiatilasto – vuosikirja 2011, Tilastokeskus)

2.1 Uusiutuvat energiat ja EU:n tavoitteet

Suomi on yhdessä EU:n kanssa sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä nykyisen ohjelman mukaisesti vuoteen 2020 mennessä. Tärkeänä osana tätä kunnianhimoista tavoitetta uusiutuvan energian velvoitepaketissa on uusiutuvan energian osuuden lisääminen kokonaisenergian kulutuksessa.

Valtiovalta on sitoutunut tavoitteisiin monin eri tavoin, joihin pääsemisen keinot voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: tuet ja avustukset, määräykset ja velvoitteet, sekä in-

formaatio-ohjaus ja neuvonta. Tavoitteina toki on kilpailukyvyn parantuminen kansainvälisillä markkinoilla ja työllisyys.

TAULUKKO 2. Uusiutuvan energian lähteet (Uusiutuvan energian velvoitepaketti, TEM 2010)

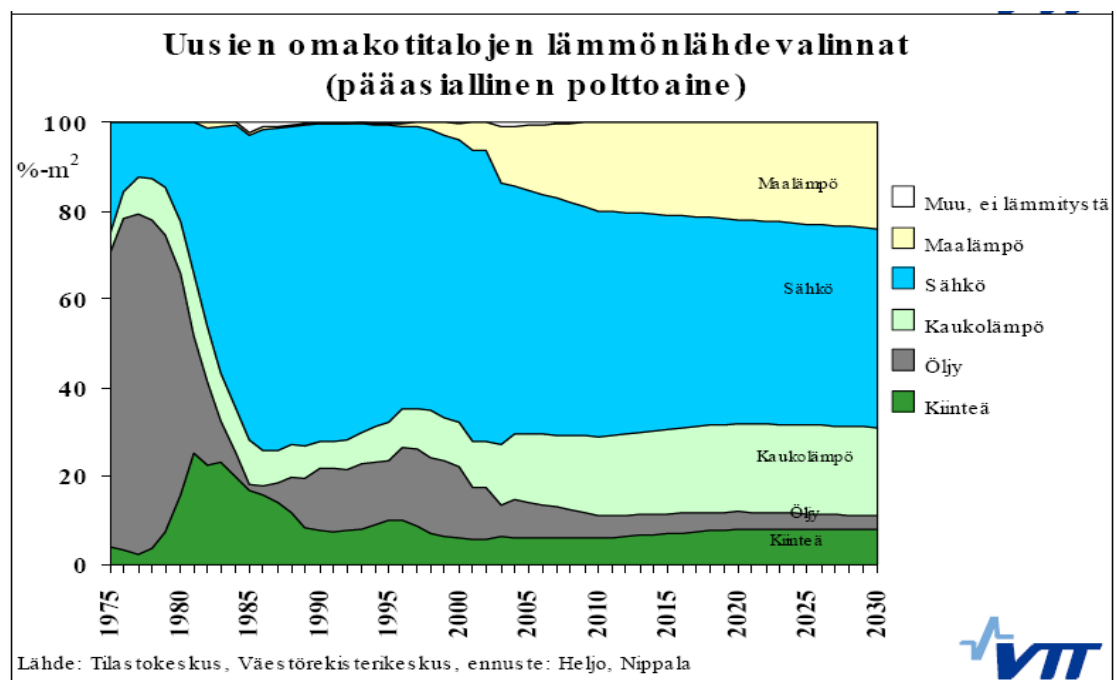
Uusiutuvat energia-lähteet / TWh	2005	2020	Muutos / TWh
Teollisuuden polttoaineet	57	56	-0,7
Vesivoima	13,6	14	0,6
Tuulivoima	0,2	6	5,8
Lämpöpumput	2	8	6,1
Aurinko ym.	0,4	0,4	0,0
Muut uusiutuvat	14	40	26
Kaikki uusiutuva	87	124	37,5
Energian loppukulutus	303	327	23,6
Uusiutuvien osuus loppukulutuksesta	28,5 %	38 %	9,5 %

Suhteellisesti isoin kasvu on asetettu tuulivoimalle. Tämä kasvu on erittäin haastava, sillä käynnistettyjä uusia tuulivoimahankkeita vastustetaan yleisesti. Tuulipuistojen vastustajat pelkäävät, että isot myllyt aiheuttavat melua ja siipien välkettä, vaikuttavat lintuihin ja muuhun lentoliikenteeseen ja ennen kaikkea pilaavat maiseman ja aiheuttavat siten taloudellisia tappioita maanomistajille (Keski-Suomen liitto, 2012). Motivan v. 2011 julkistaman tutkimuksen mukaan tuulivoimaloita vastustetaan paljon etukäteen, mutta kun voimalaitokset ovat käynnistyneet, huomataan, ettei niistä niin paljon haittaa ole (Motiva, 2011). Lämpöpumppujen kasvu saattaa hyvinkin toteutua, ainakin jos markkinoilta kantautuviin tietoihin on uskomista. Terawattitunteina isointa kasvua odotetaan metsähakkeen käytöstä, jolla halutaan korvata tuontihiili. Samalla halutaan parantaa Suomen omavaraisuutta noin 30 %:sta 40 %:iin. Vertailun vuoksi Suomessa sähkön kokonaiskulutus oli vuonna 2010 87,7 terawattituntia [TWh] eli miljardia kilowattituntia [kWh] noussen edellisvuodesta 8 %. Kulutuksesta 88 prosenttia katettiin kotimaisella tuotannolla ja loput 12 prosenttia sähkön nettotuonnilla (Tilastokeskus 2011).

Mediassa jatkuvasti esillä oleva aurinkoenergian hyödyntäminen aurinkokeräimillä ja -paneeleilla ei ainakaan näytä näkyvän tavoitteissa ollenkaan. Saksassa tuotettiin vuonna 2010 jo 2 % sähköenergiasta aurinkovoimalla. Tavoitteeksi on asetettu kasvattaa osuus 25 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä. Suomi ei ole juuri Keski-Eurooppaa huonompi alue aurinkoenergian tuottamiseen. Aurinkoenergiajärjestelmien hinnat ovat romahtaneet viime vuosina. Saksassa kuluttajille myytävät kokonaisjärjestelmät maksavat 2 – 2,5 euroa wattia kohden. Nimellisteholtaan yhden kilowatin aurinkosähköjärjestelmä, jossa on 7 – 8 neliometriä paneeleita, voi tuottaa 900 kWh sähköenergiaa vuodessa. Suomen olisi syytä ottaa tavoitteekseen myös aurinkoenergian laajamittaisen käytön lisääminen. Tarvitaan mahdollisesti määräyksiä, tukia ja neuvontaa (Ahola, J & Lindh T. 2012).

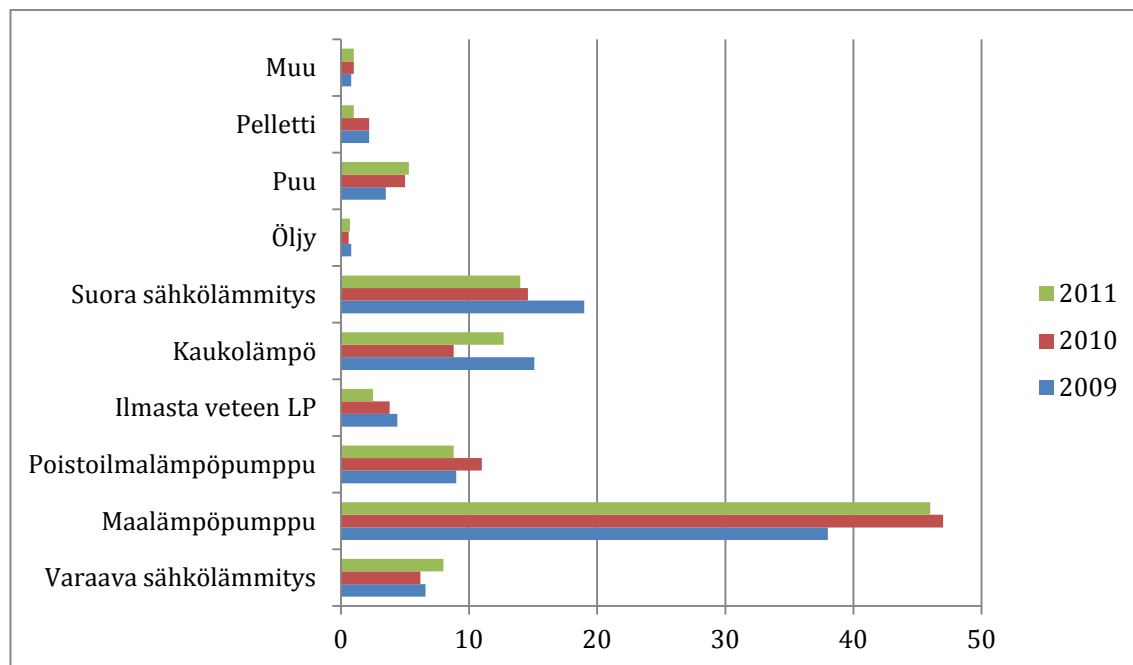
2.2 Rakennusten lämmittäminen uusiutuvalla energialla

Rakennusten lämmitystavoissa on vuosien mittaan tapahtunut isoja muutoksia. Omakotitaloissa perinteinen tapa lämmittää puulla muuttui 70-luvulla öljylämmitykseksi vaihtuen hyvin nopeasti erilaisiksi tavoiksi lämmittää sähköllä. VTT:n ennustus vuodelta 2005 kertoo aiheen vaikean ennustettavuuden.



KUVA 2. Uusien omakotitalojen lämmönlähdevalinnat (Nippala, 2009)

Vuodelta 2011 oleva Pientalorakentamisen kehittämiskeskus ry PRKK:n tutkimustulos kertoo erilaisten lämpöpumppuratkaisujen nousseen jo yli puoleen uusien omakotitalojen lämmönlähdevalinnoissa.



KUVA 3. Pientalorakentamisen kehittämiskeskus ry PRKK:n tutkimustulos (Jaakkola 2011)

Vuonna 2011 sähkölämmityksen osuus on pudonnut noin 22 %:iin uusien omakotitalojen päälämmönlähdevalinnoissa. Tulevissa uusissa rakentamismääräyksissä sähkön käyttö pelkkänä päälämmitysjärjestelmän energianlähteenä on haluttu tehdä nykyisten määräysten mukaista rakentamista vaikeammaksi. Toisaalta tavoitteet vuonna 2020 rakentaa matalaenergiataloja, joissa rakennuksen ulkopuolelta ostettavaa energiaa saa olla nykyistä paljon vähemmän, tekevät sen, että monia eri energianlähteitä hyödyntäviä teknologioita ja tapoja jakaa lämpöä tulee markkinoille. Öljylämmityksen osuus on viime vuosina pudonnut alas, edustaen vain noin prosentin osuutta uusissa pientaloissa (Ympäristöministeriö 2011).

Ympäristöministeriön uusissa määräyksissä on eri lähestymistapa rakennuksen energiakulutukseen kuin aikaisemmin. 1.7.2012 voimaan astuvat määräykset siirtyvät kokonaisenergiankulutukseen perustuvaan sääntelyyn ja primäärienergiakertoimien käyttöön. Määräysten luonnoksessa sähkölle oli esitetty kerrointa 2,0, mutta tämä muuttui laajojen selvitysten ja lausuntojen johdosta kertoimeksi 1,7. Uusiutuva energia saa kertoimen

0,5. Jarek Kurnitski on tutkimuksissaan perustellut kertoimia mm. päästölaskennalla. Periaate hänen esityksissään on yksinkertainen: pitää tuntea pääosin päästöjä aiheuttavat energiatuotantomuodot ja vähentää näihin kohdistuvaa energiankulutusta. Tulevissa rakennuksissa tämä merkitsee sähkölämmityksen vähenemistä, kaukolämmön lisäämistä, öljylämmityksestä pois jäämistä sekä uusiutuvien energialähteiden lisäämistä. Lämpöpumpuilla ja biopolttoaineilla on tällöin Suomessa suurin kasvupotentiaali (Kurnitski 2009).

2.3 Maaperään varastoitunut lämpö

Geoterminen lämpö on maankuoren sisällä syntyvää ja olevaa lämpöä. Geoterminen lämpö syntyy radioaktiivisten aineiden hajotessa maapallon kuoressa tai vaipassa. Radioaktiivisten aineiden hajoamisesta vapautuu lämpöä, joka varastoituu maankuoren sisälle. Lämpöä voidaan johtaa maan pinnalle ja hyödyntää esim. lämmityksessä. Geoterminen lämpö on yleensä sitoutunut kuumaan veteen tai höyryyn. Suurimpia geotermisen lämmön hyödyntäjiä ovat Aasian saarivaltiot. Pohjoismaista Islannissa on paljon lämpimiä pohjavesiä, joista saatavaa lämpöä voidaan hyödyntää sekä lämmitykseen että energian tuotantoon. Suomen kallioperä ei ole riittävän lämmintä geotermisen lämmön hyödyntämiseksi.

Maalämpö on auringon maahan säteilemää ja maankuoreen varastoitunutta lämpöä. Maalämpöä voidaan hyödyntää lämpöpumpun avulla mm. maaperästä sekä pinta- ja pohjavesistä. Lämpöpumpun avulla voidaan hyödyntää myös ulkoilman, rakennusten poistoilman sekä jätevesien sisältämää lämpöä. Jätevesillä tarkoitetaan tässä teollisuuden lämpimiä jätevesiä sekä uimahallien ja pesuloiden jätevesiä. Suomessa maaperän lämpöä on hyödynnetty kasvavassa määrin pientalojen lämmityksessä. Aivan viime vuosina on ollut esimerkkikohteita, esim. kerrostaloja, jotka ovat siirtyneet öljylämmityksestä ja jopa kaukolämmöstä maalämpöön. Isoja uudiskohteita kuten varastoja on rakennettu maalämmön varaan. Energiayhtiöt ovat odottavalla kannalla markkinoiden avautumisen suhteen (Fortum 2011).

Sellaisissa suurissa kallioenergiajärjestelmissä, joita suunnitellaan Suomessa Geologian Tutkimuskeskuksessa GTK:ssa, kaivoja käytetään tyypillisesti myös rakennuksen vii-

lennykseen. Erityisesti toimistorakennuksissa viilennystarve voi olla jopa suurempi kuin lämmitystarve. Joskus viilennys voidaan hoitaa myös ns. vapaaviilennyksenä, jolloin viilennyksen tuottamiseen ei tarvita kompressoria. Tällöin pumpulla ainoastaan kierrätetään kaivoista tulevaa viileää nestettä esim. lattiaviilennysputkissa. Jos rakennuksen lämmitys- ja viilennystarve ovat määrältään lähellä toisiaan, energiakaivokenttä (tai yksittäinen kaivo) toimii huomattavasti tasapainoisemmin. Tällöin lämpötila ei laske vuodesta toiseen, vaan pysyy tasaisena. Kalliolämpöjärjestelmän toiminnan kannalta on tärkeää mitoittaa lämpökaivo ja lämmönoton keskiteho kallioperän ominaisuuksien mukaan oikein (Leppäharju 2009, 72).

3 MAALÄMPÖPUMPPU

Maalämpö on maaperään ja vesistöön lämpimän kauden aikana varastoitunutta aurinkolämpöä, joka lämpöenergiaa tarvittaessa otetaan käyttöön lämpöpumpputekniikkaa hyväksi käyttäen. Lämpöpumpulla voidaan siirtää lämpöä alemmista lämpötiloista korkeampiin lämpötiloihin eli lämmitettäviin tiloihin ja käyttöveteen. Toiminnan ymmärtämiseksi tulee tietää lämmön siirtymiseen liittyvät päämekanismit: lämpö voi siirtyä johtumalla, kulkeutumalla väliaineen mukana tai säteilyinä.

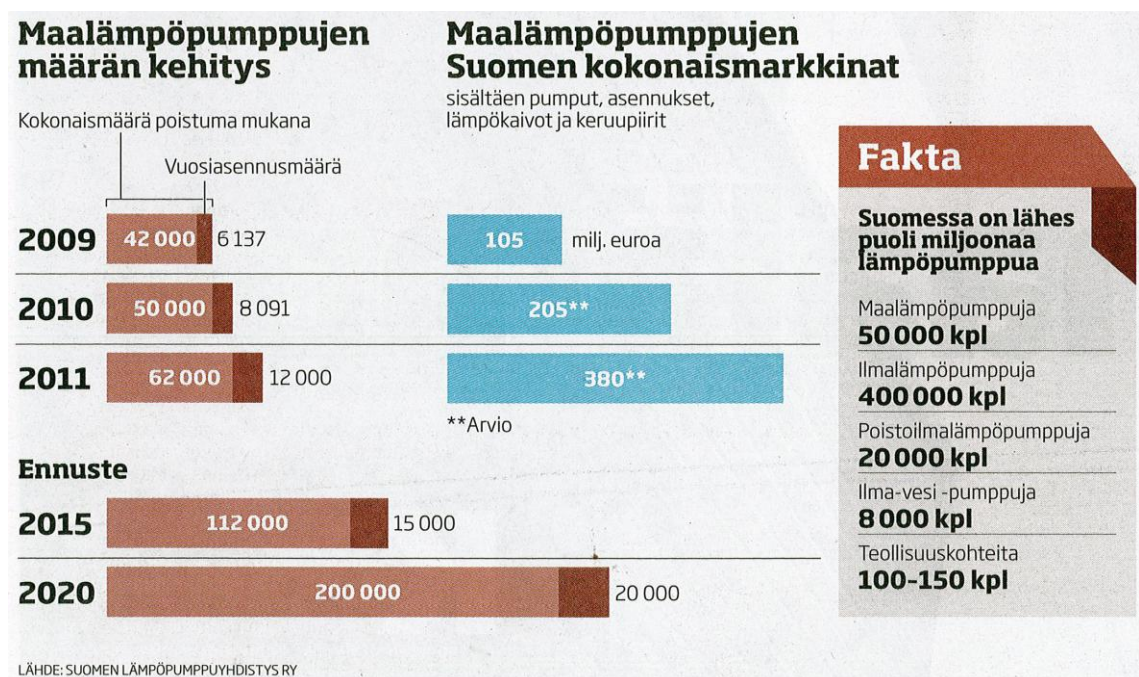
3.1 Lämpöpumppujen historia

Höyrykoneita käytettiin jo 1700-luvulla kuitenkin ymmärtämättä niihin liittyviä yleisiä teorioita. Niiden hyötysuhteet olivat vielä 1800-luvun alussa vain noin 6 %; 94 % käytetystä polttoaineesta meni hukkaan. Insinöörit yrittivät parantaa hyötysuhdetta etsien keinoja, joilla säästettiin polttoainetta ja lisättiin tuotetun käyttökelpoisen työn määrää eliminoimalla lämmön hukkaa, parantamalla rakennetta ja materiaaleja ja kokeilemalla erikokoisia laitteita parhaan kompromissin löytämiseksi. Ranskalainen upseeri ja insinööri Sidi Carnot oli ensimmäinen, joka järjestelmällisesti tutkimalla pyrki löytämään yleisiä termodynamiikan lakeja. Hän löysi yleistämällä uuden yleispätevän lain: lämpöä on mahdotonta saada tekemään työtä menettämättä samalla jonkin verran lämpöä. Hän myös pohti mitä tapahtuisi, jos saisi lämpökoneen toimimaan takaperin. Työn tuottamisen sijasta se kuluttaisi työtä siirtäen samalla koko ajan lämpöä viileämmästä säiliöstä kuumaan. Siitä tulisi itse asiassa jääkaappi. Näistä teorioista kehitettiin lämpöpumppu (von Bayern 2000, 39).

Kun uusiutuvien energialähteiden käyttöä halutaan voimakkaasti lisätä ja niistä saadut kokemukset ovat osoittautuneet positiivisiksi, on maalämpöpumppujen suosio ollut kovassa kasvussa maailmanlaajuisesti. Voimakkain kasvu on ollut Yhdysvalloissa ja Euroopassa, missä Ruotsi on ollut edelläkävijä; esim. vuonna 2006 rakennettiin Ruotsissa noin 40000 lämpökaivoa. Kaikissa maissa pääperiaate on sama, mutta geologisista olosuhteista ja paikallisista määräyksistä johtuen käytännön toteutustavat ovat erilaisia.

Suomessa yleistynyt tapa on porata kalliokaivo, jonka annetaan täyttyä vedellä (Suomen ympäristökeskus 2009, 10).

Suomeen ensimmäiset maalämpöjärjestelmät tehtiin 1970-luvulla. Laitteet eivät aluksi olleet teollisesti sarjavalmistettuja, ja järjestelmien toimivuudessa oli ongelmia mitoituksen, komponenttien, kokonaissuunnittelun ja asennuksen ollessa osaksi kokeilun asteella. Energian hinnan heilunta pienensi lämpöpumppujen kysyntää, kunnes jälleen 2000-luvulla niiden suosio lähti uuteen nousuun. Ala on tällä hetkellä rajassa kasvussa, ja asennettuja maalämpöpumppuja on noin 62000 kpl. Syinä maalämpöön siirtymiseen on ollut mm. investoinnin lyhentynyt takaisinmaksuaika, halu olla riippumattomampi ostoenergiasta sekä saadut energia-avustukset. Vuosi 2011 oli todellinen kasvun vuosi tehtyjen asennusten määrän kasvaessa 8000:sta 14000:een (Sulpu 2012).

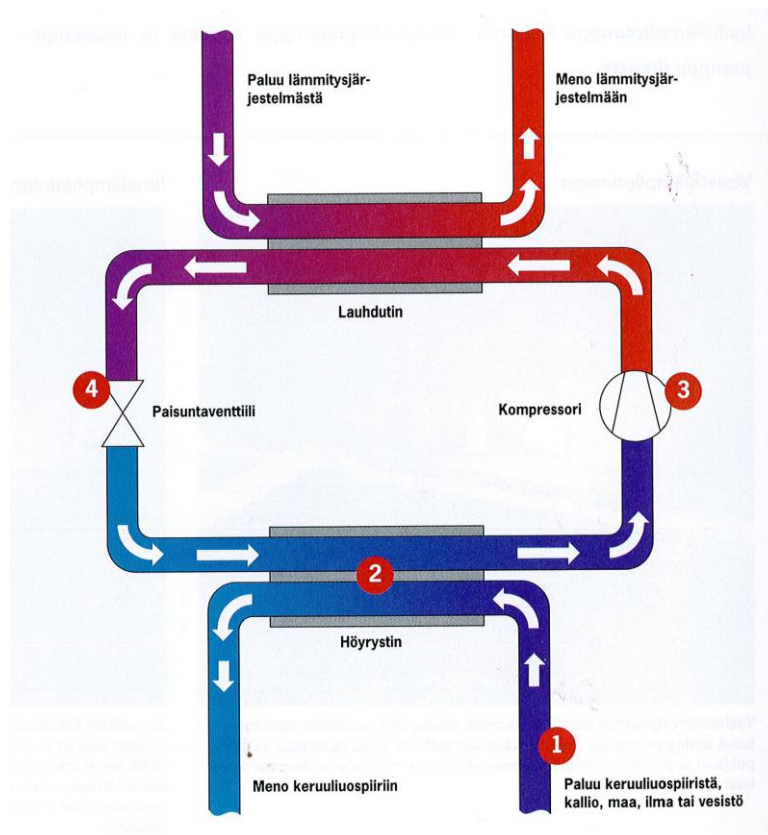


KUVA 4. Maalämpöpumppujen markkinat Suomessa (Tekniikka & Talous, 2011)

3.2 Fysikaaliset perusteet

Lämpöpumpussa on kyseessä kylmätekninen kiertoprosessi, jossa työaineena toimii kylmäaine, jonka höyrystymistä ja lauhtumista käytetään hyväksi (faasimuutos). Höyrystimessä alhaisessa paineessa oleva kylmäaine ottaa ulkoilmaan, maaperään tai veteen sitoutunutta lämpöä itseensä, höyrystyy ja kiehuu (lämpötila noin 0 °C). Seuraavaksi

kompressorin imee höyrystyneen kylmäaineen höyrystimestä ja nostaa sen paineen korkeammalle puristamalla kylmäaineen pieneen tilaan. Samalla lämpötila kasvaa. Kompressorin jälkeen kuuma, noin sata-asteinen korkeapaineinen kylmäainehöyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se luovuttaa sitomansa lämmön haluttuun välitysaineeseen. Paineen pudotessa laskee myös lämpötila. Tämän jälkeen jäähdytetty nestemäinen kylmäaine siirtyy paineenalennusventtiiliin kautta prosessissa eteenpäin. Tässä sen paine putoaa alhaiseksi ja lämpötila laskee noin -10-asteiseksi °C. Kierto jatkuu takaisin höyrystimeen (Aittomäki, 2001).



KUVA 5. Lämpöpumpun toimintaperiaate (Suuri Lämpöpumppukirja, Thermia Partners Oy 2008, 12)

3.3 Toimintaperiaatteet ja komponentit

Käytännössä lämpöpumppu koostuu useista muistakin tehokkaan toiminnan kannalta oleellisista komponenteista. Näiden keskinäinen mitoitus, yhteistyö ja ohjaaminen vaikuttaa siihen kuinka kustannustehokas lämpöpumppu on valmistettu. Laadukkaiden komponenttien käyttö takaa pitkäikäisen ja huoltovapaan käyttöön lämpöpumpulle.

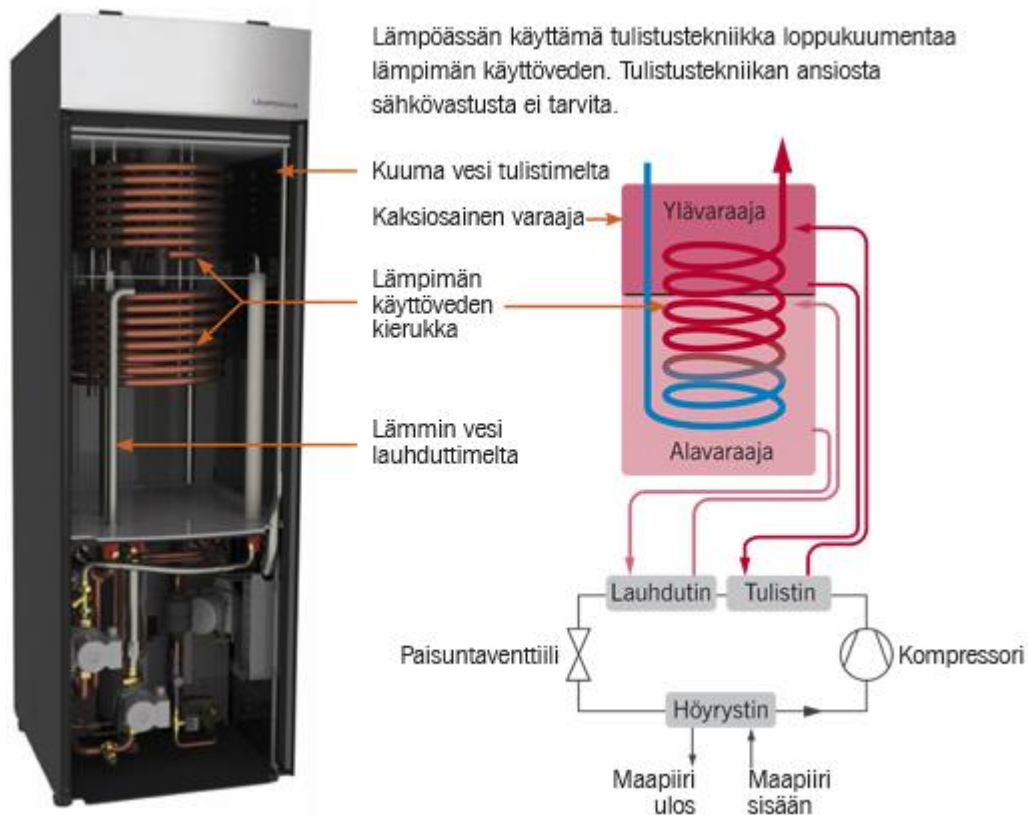
Kriittisimmät komponentit ovat kompressori, erilaiset venttiilit sekä ohjauselektronikka. Mahdollisesti kiertovesipumppujen vaihtoon täytyy varautua maalämpöpumpun koko elinkaaren aikana.

3.4 Lämpökerroin

Lämpökerrointa COP (Coefficient Of Performance) käytetään arvioitaessa lämpöpumpun tehokkuutta. Se kertoo lämpöpumpun annetun teoreettisen lämmöntuoton suhteen laitteiston käyttöön tarvittavaan (sähkö)energiaan. Esimerkiksi COP-arvo $\varphi = 4,0$ kertoo, että saatu lämmitysteho on nelinkertainen sähköverkosta otettuun tehoon nähden. Vuosilämpökerroin SPF-arvo (Seasonal Performance Factor) φ_{vuosi} on lämpöpumpun koko vuoden ajalta keskiarvona laskettu lämpökerroin. Eri valmistajien ilmoittamien COP-arvojen mittaus on standardoitu (SFS-EN 14511) niin, että olosuhteet mittauksessa ovat kaikille laitteille samanlaiset. Tällöin lämpökertoimissa pitäisi olla huomioitu kompressorin sähkönkulutus, pumppujen puhaltimien sekä höyrystimien ja lauhduttimien painehäviöstä aiheutuva sähkönkulutus.

3.5 Osateho vai täystehopumppu ?

Maalämpöjärjestelmät mitoitetaan joko osatehoisina tai täystehoisina. Järjestelmien paremmuudesta Suomen olosuhteissa kiistellään monin eri tavoin perustellen. Ruotsalaiset maalämpöpumppuvalmistajat ovat keskittyneet osatehoisiin pumppuihin suomalaisten valmistaessa täystehopumppuja. Täystehomitoitettu järjestelmä on mitoitettu tuottamaan rakennuksen koko lämmitysteho kovimmillakin pakkasilla ilman sähkövastusten kautta tuotettavaa lisälämpöä. Tämä johtaa suurempaan maalämpöpumpun kokoon ja porareian syvyyteen, mikä nostaa kustannuksia. Täystehomitoitettu maalämpöpumppu käy tavanomaisissa olosuhteissa huomattavasti lyhyempiä käyntisyklejä kuin osatehomaa-lämpöpumppu suuremmasta tehosta johtuen. Osatehomitoitettu järjestelmä on hankintakustannuksiltaan edullisempi, ja noin 80 % tehopeitto riittää tuottamaan 99 % vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta. Huippupakkasilla 20 % tehon tarpeesta tuotetaan lisä-vastuksilla. Lisävastusten kuluttaman sähköenergian kustannukset ovat 80 % tehopeitolla tyypillisesti 20 – 30 euroa vuodessa (Senera 2012).



KUVA 6. Lämpöässä täystehoinen maalämpöpumppu (Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy 2010)

Kylmäaineen ominaisuuksien ja tulistustekniikan oikealla hyödyntämisellä saadaan kylmähöyryprosessista parhaat ja energiatehokkaimmat arvot. Tulistuksen tapahtuessa pääosin kompressorissa, on lämpökertoimen parantamisella suora vaikutus sähköenergian kulutukseen. Iso merkitys vuosihyötysuhteelle on sillä, minkälaisia lämpötiloja maalämpöpumpulla lämmitettävälle vedelle halutaan. Tämä vaihtelee käyttäjittäin; toisilla lämmitetään pääasiassa lattialämmityksen käyttämää +35-asteista vettä, kun toisessa rakennuksessa kuluu paljon +55-asteista käyttövettä. Saattaa olla jopa energiatehokasta säätää lauhtumislämpötilatasoa vuodenaikojen ja veden käytön tarpeen mukaan (Saksi 2009, 84).

Osatehopumppuvalmistajat väittävät täystehomitoitetun maalämpöpumppujärjestelmän olevan energiataloudellisin pääsääntöisesti ainoastaan silloin, kun käytetään portaattomalla kierrosluvun säädöllä varustettua maalämpöpumppua. Tällöin laitekustannukset

kuitenkin ovat korkeammat. Vastaavasti täystehopumpuissa on aina lisäksi ulkopuolinen lämminvesivaraaja, joka maksaa ja vaatii tilaa. Markkinoilta puuttuu edelleenkin vertailevaa tietoa eri tekniikoiden väliltä. Tarvitaan luotettavia laskelmia, jotka ottavat huomioon investointi- ja käyttökustannukset riittävän pitkältä ajalta erilaisten vuosien lämmitystarpeet huomioon ottaen.

3.6 Porauksen syvyys ja teoreettinen teho

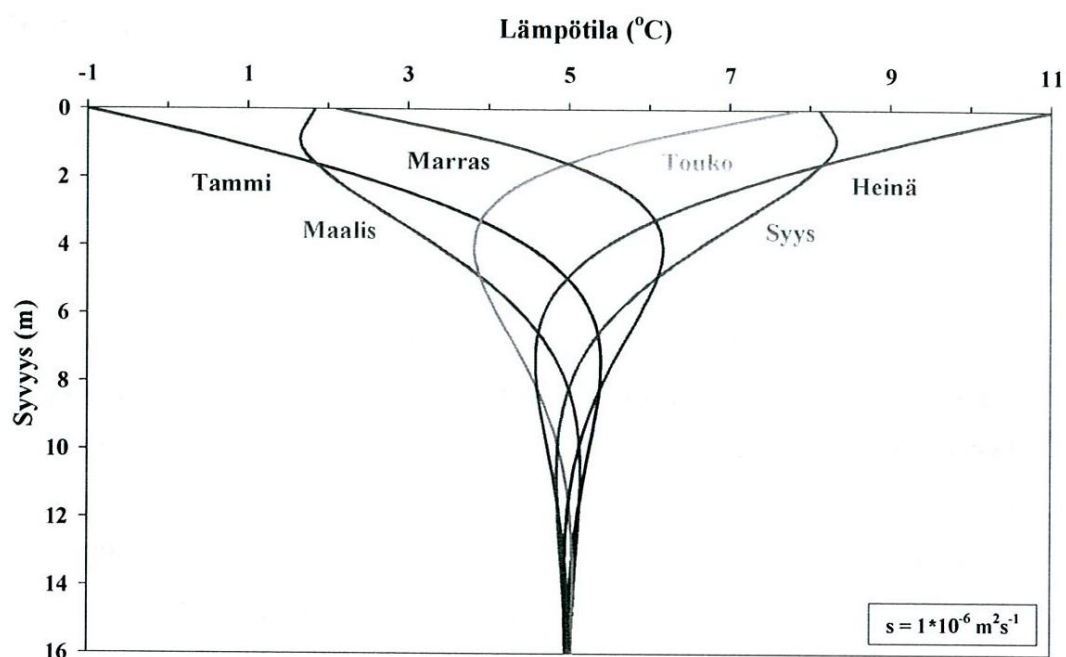
Maalämpöpumppu ottaa tarvitsemansa lämmön maaperästä, johon lämpöenergiaa varastoituu lämpimän kauden aikana auringon säteilystä. Tällöin maaperässä lämpöä siirtyy pääasiassa johtumalla (konduktio) ja konvektiolla, joka on lämmön kulkeutumista nestemäisen aineen, tässä tapauksessa pohjaveden, mukana. Kalliokaivossa kiinteän kiviaineksen lämpösisältöä nimitetään lämpösisällöksi Q [J], jonka muutoksen suuruus riippuu kiviaineksen ominaislämpökapasiteetista c_p [J/kgK]:

$$\Delta Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T, \quad (1)$$

jossa m on massa ja ΔT on lämpötilan muutos.

Ominaislämpökapasiteetti kertoo kiviaineksen kykyä varastoida lämpöä. Kallion ominaislämpökapasiteetti on suuruusluokkaa 700 – 900 J/kgK ja veden paljon korkeampi 4200 J/kgK.

Lämpötila maaperässä auringon säätelemänä muuttuu ajan suhteen jaksollisina muutoksina, joissa on säännöllisiä vuorokausi- ja vuosisyklejä. Lisäksi epäsäännölliset sään muutokset aiheuttavat muutoksia maanperän pintalämpötilassa. Noin 10 – 15 metrin syvyydessä vuosittainen pintalämpötilan vaihtelu on suodattunut pois ja lämpötila on pintalämpötilan vaihtelun keskiarvo eli maanpinnan keskilämpötila. Noin 15 metriä syvemmällä lämpötila maankamarassa on maanpinnan keskilämpötilan ja geotermisen gradientin säätelemä. Geotermisen gradientti nostaa lämpötilaa noin 0,8 – 1,5 K/100m, joten mitä syvemmälle mennään, sitä lämpimämpää on kallioperä (Leppäharju 2008, 7). Kuvassa 7 on teoreettiset lämpötila-syvyyskäyrät joka toiselle kuukaudelle. Maanpinnan keskilämpötila on 5 °C.



KUVA 7. Maaperän pintalämpötilan riippuvuus vuodenajasta (Leppäharju 2008, 7)

Suomessa maanpinnan keskilämpötilan on mitattu olevan pari astetta korkeampi kuin ilman lämpötilan. Vuosittaisen ilman keskilämpötilan T_A [°C] ja maanpinnan keskilämpötilan T_0 [°C] välillä on Suomessa lineaarinen riippuvuus (Leppäharju 2008, 10):

$$T_0 = 0,71 \cdot T_A + 2,93. \quad (2)$$

Arvioitaessa kallioperään porattavan reiän syvyyttä, on ensimmäinen lähtökohta selvittää tarvittava energia vuodessa [kWh]. Lämpöpumpuille on valmistajan ilmoittama SPF-arvo, jonka avulla lasketaan kallioperästä saatavan ilmaisenergian osuus. Jos vuosittainen energiantarve on 20000 kWh, ja maalämpöpumpun SPF-arvo on 3, saadaan ilmaisenergiaksi 13330 kWh. Maalämpöpumppumyyjät käyttävät nyrkkisääntönä reiän syvyydeksi 1m tarvittavaa 100 kWh:a kohti. Tässä tapauksessa reiän syvyydeksi saadaan 133,3 m. Useat myyjät lisäävät tähän 10 m varmuusvaraksi.

Maanpinnan keskilämpötilan ollessa +5 °C, saadaan käytettäessä EED (Earth Energy designer) –tietokoneohjelmaa kalliokaivon syvyydeksi 143,3 m. EED-ohjelma on kehitetty Lundin yliopistossa Ruotsissa ja se perustuu Eskilsonin malliin, joka on yhdistelmä analyttisistä ja numeerisista ratkaisumenetelmistä. Tällöin mallinnuksessa on käytetty

tiettyjä kallioperän ja lämpökaivon parametriarvoja, jotka vastaavat Suomen keskimääräisiä arvoja. Tulokset ovat 1 desimaalin tarkkuudella samat kuin edellisessä nyrkkisääntömitoituksessa, mikä on tämän työn tekijän mielestä yllättävä tulos, varsinkin kun esim. kiviaineksen lämmönjohtavuusarvo [W/mK] vaikuttaa tulokseen merkittävästi. Ohjelman käyttämä lämmönjohtavuusarvo oli 3,25 W/mK, kun tyypillisten suomalais-ten kivilajien lämmönjohtavuus on normaalisti välillä 2,75 W/mK ja 3,75 W/mK, ääriarvojen ollessa 2,25 W/mK ja 4,25 W/mK. Ääriarvojen välillä on melkein 40 metrin ero kalliokaivon syvyydessä. Ohjelmalla on laskettu kalliokaivosta otettava vuosittainen lämmönoton keskiarvoteho, joka on 10,6 W/m eli 1522 W / kalliokaivo (143,3 m) (Leppäharju 2008, 62).

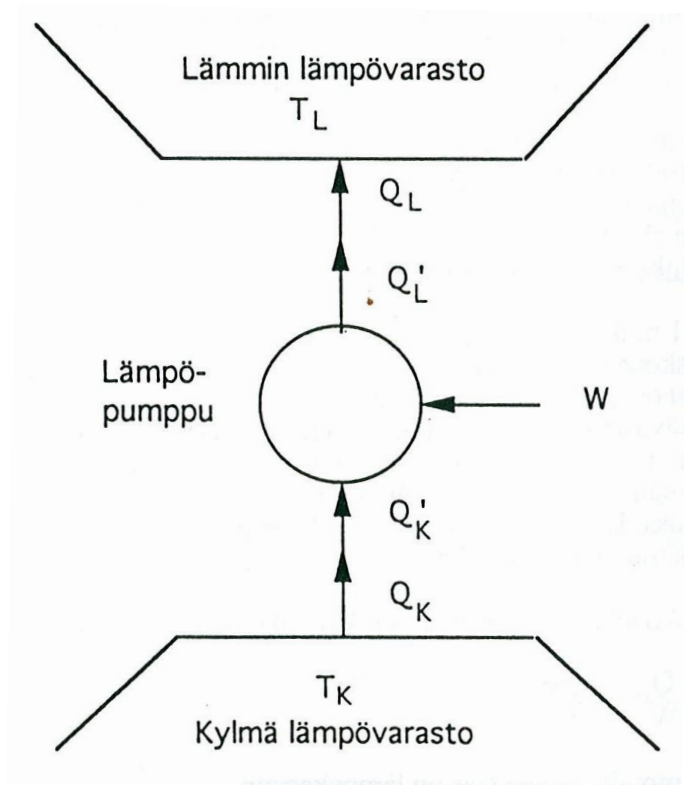
Suurissa kallioenergiajärjestelmissä, joita suunnitellaan esimerkiksi GTK:ssa, kalliokaivoja käytetään tyypillisesti myös rakennuksen viilennykseen. Erityisesti toimistorakennuksissa viilennystarve voi olla jopa suurempi kuin lämmitystarve. Joskus viilennys voidaan hoitaa myös ns. vapaaviilennyksenä, jolloin viilennyksen tuottamiseen ei tarvita kompressoria. Tällöin pumpulla ainoastaan kierrätetään kaivoista tulevaa viileää nestettä esim. lattiaviilennysputkissa. Jos rakennuksen lämmitys- ja viilennystarve ovat määrältään lähellä toisiaan, energiakaivokenttä (tai yksittäinen kalliokaivo) toimii huomattavasti tasapainoisemmin. Lämpötila ei laske vuodesta toiseen, vaan pysyy tasaisena. Tällöin pienempi määrä kalliokaivoja ja pienempi yhteissyvyys riittää (Leppäharju 2010).

Tulevina vuosina yksi mielenkiintoinen aihe olisi selvittää, mitä vaikuttaisi hieman alimittaisen kalliokaivon poraaminen. Talvella se pääsisi jäätymään ja kesällä kaivoon voitaisiin siirtää aurinkokeräimien tuottamaa lämpöä, joka varastoituisi uudelleenkäytettäväksi lämmityskauden aikana. Toteutukseen saattaa liittyä teknisiä ongelmia, esimerkiksi putkien yhdyskappaleen eli mutkan jäätymisenkesto.

4 COP-ARVOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT JA SEN LASKEMINEN

4.1 Fysikaaliset suureet ja teoria

Seuraavassa kuvassa 8 on periaatteellisesti esitetty lämmön siirtyminen matalan lämpötilan T_K lämpövarastosta korkean lämpötilan T_L varastoon. Oleellista on, että prosessiin on liitetty työkon, jonka tila ei muutu (Wiksten 1996, 135).



KUVA 8. Lämmön siirtyminen matalan lämpötilan T_K varastosta korkean lämpötilan T_L varastoon (Wiksten 1996, 135)

Kuva esittää käänteistä lämpövoimakonetta, jonka prosessia tässä tapauksessa kutsutaan käänteiseksi Clausius-Rankinen prosessiksi eli kylmähöyryprosessiksi. Kun prosessia käytetään lämpöpumpuna, saadaan tulokseksi esimerkiksi tilan lämmittäminen. Hyödyksi on tullut ympäristöstä otettu lämpö lisättynä lämpöpumpun mekaanisella energialla. Ympäristö vastaavasti on jäähtynyt alle luonnollisen lämpötilansa.

Termodynamiikan ensimmäistä pääsääntöä voidaan soveltaa:

$$W + Q'_K + Q'_L = W - Q_L - Q_K = 0, \quad (3)$$

jossa korkean lämpötilan varastoon menevä lämpö on Q_L , matalan lämpötilan varastosta otettava lämpö Q_K ja W on prosessiin tuotu työ. Prosessia, johon tuodaan työtä, kutsutaan työkoneprosessiksi.

Jäähdytyskoneille ja lämpöpumpuille tärkeät suureet ovat kylmäkerroin ε ja lämpökerroin ε_L :

$$\varepsilon = -Q_K / W = Q'_K / W. \quad (4)$$

$$\varepsilon_L = Q_L / W = (W + Q'_K) / W = 1 + (Q'_K / W) = 1 + \varepsilon. \quad (5)$$

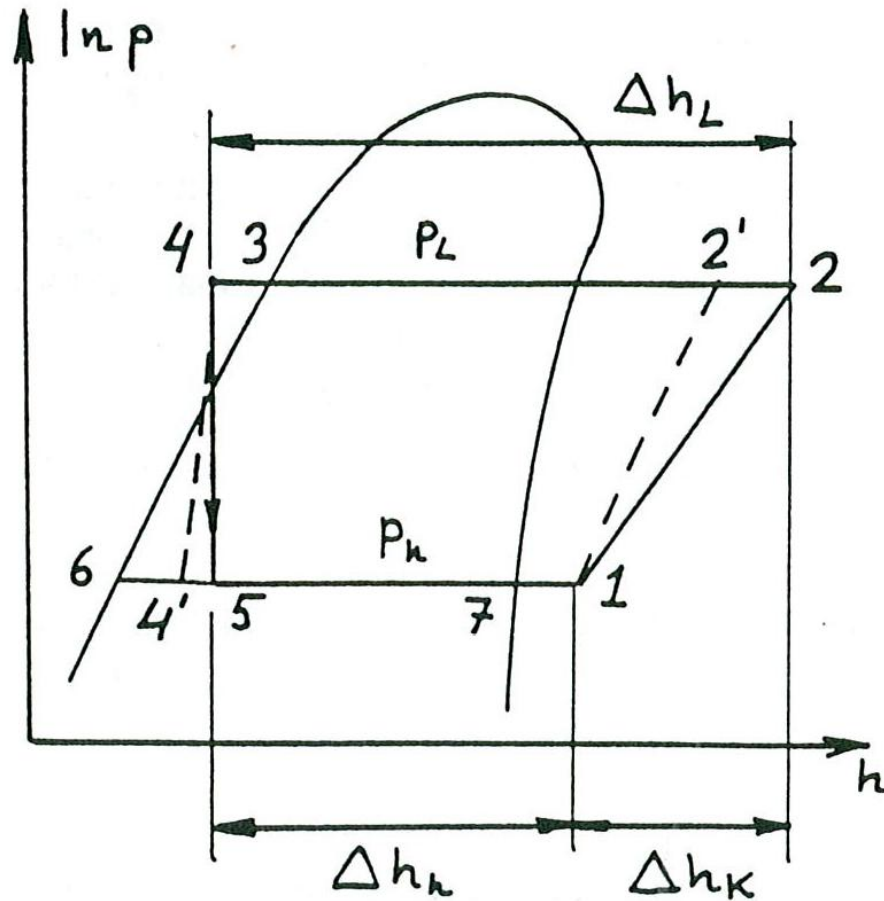
Carnot-jäähdytyskoneen kylmäkerroin on:

$$\varepsilon = T_K / (T_L - T_K). \quad (6)$$

Carnot-lämpöpumpun lämpökerroin on:

$$\varepsilon_{CK} = 1 + T_K / (T_L - T_K) = T_L / (T_L - T_K). \quad (7)$$

Kylmähöyryprosessin havainnollistamiseksi on otettu käyttöön tilapiirros, jota kutsutaan yleisesti Log p-h (paine-entalpia) -piirroksiksi. Kuvassa 9 on luonnos p-h tilapiirroksista, johon eri kylmäaineen olomuodot on piirretty. Tätä kutsutaan myös lämpöpumpun alikriittiseksi yksiportaiseksi prosessiksi imukaasuvaihtimella (Saksi 2009, 46).



KUVA 9. Log p-h tilapiirros (Wiksten 1996, 141)

Oordinaattana on paine p [bar] skaalattuna logaritmisena asteikon mukaan. Abskissana on tasetilan sisältämän aineen entalpia eli lämpösisältö h [kJ/kg]. Aineen rajakäyrä jakaa kylmäaineen kolmeen olomuotoon: vasemmalla on kylläinen neste, keskellä nesteen ja höyryn sekoittunut seos ja oikealla kylläinen höyry. Rajakäyrän huipulla on kriittinen piste, jonka yläpuolella kaasu ei enää tiivisty nesteeksi vaikka paine nousisikin. Eri kylmäaineille on saatavilla valmiit tilapiirroksat, joihin on paineen, entalpian ja lämpötilan lisäksi valmiiksi piirretty vakioentropia- [kJ/kgK], ominaistilavuus- [m³/kg] ja x-kuvaajat [%]. Tilapiirroksia avuksi käyttäen voidaan lähteä hahmottamaan kylmähöyryprosessin vaiheita, kun esimerkiksi mittaamalla saadaan lämpötiloja tai paineita prosessin eri vaiheista.

Tilapiirroksista saadaan lämpöpumpun lämpökerroin:

$$\varepsilon_L = (h_2 - h_4) / (h_2 - h_1) = \Delta h_L / \Delta h_K . \quad (8)$$

Lasketaan isentrooppinen hyötysuhde η_s , joka on teoreettisen ja todellisen puristustyön välinen suhde:

$$\eta_s = (h_2' - h_1) / (h_2 - h_1). \quad (9)$$

Käytännön lämpöpumpuissa isentrooppinen hyötysuhde on 0,65...0,90 (Nydal 2002, 96). On olemassa taulukoita, joista voidaan katsoa isentrooppinen hyötysuhde puristussuhteen funktiona. Puristussuhteella tarkoitetaan lauhtumispaineen ja höyrystymispaineen välistä suhdetta. Lisäksi prosessissa syntyy painehäviöitä lauhduttimessa, höyrystimessä ja putkistossa kylmäaineen virratessa niiden läpi.

Todellisessa lämpöpumpppuolosuhteissa on kompressorin sisäisistä olosuhteista johtuvia häviöitä, jotka lämpöhäviöinä ympäristöön ovat noin 5-10 % kompressorin puristustyön kuluttamasta energiasta (Saksi 2009, 45). Lasketaan entalpian h_2 arvo kun lämpöhäviöksi arvioidaan 5 %:

$$h_2 = h_1 + 0,95 \cdot (h_2' - h_1) / \eta_s. \quad (10)$$

Kompressorissa syntyvät kaikki kylmätehon pienenemiseen vaikuttavat häviöt lasketaan yhteen yhteiseksi hyötysuhteeksi, jota kutsutaan tuottosuhteeksi, joka kertoo todellisen imuputken tilavuusvirran suhteen kompressorin geometriseen tilavuusvirtaan:

$$\lambda = q_v / q_{vg}, \quad (11)$$

jossa λ on tuottosuhte, q_v on todellinen tilavuusvirta [m^3/s] ja q_{vg} on geometrinen tilavuusvirta [m^3/s].

Käytännössä tuottosuhte tarkistetaan valmistajien antamista taulukoista puristussuhteen funktiona eri kompressorityypeille.

4.2 Ulkopuolinen (sähkö)energia

Teorian mukaisesti on prosessiin tuotu ulkopuolinen energia suoraan lämpökertoimeen vaikuttava suure. Maalämpöpumpuissa kompressorin on se komponentti, joka tekee koko kylmähöyryprosessin vaatiman ulkopuolelta tuodun työn. Laskettaessa COP-arvoja, SPF-arvoja tai hyötysuhteita yleensäkin, on tiedettävä kompressorin kuluttama teho. Työn tekijän mielestä maalämpöpumppuasennuksissa pitäisi asentaa sähkökytkentöjen yhteydessä erillinen pelkästään maalämpöpumpun kulutusta mittaava kWh-mittari. Talon huoltokirjaan yhtenä vuosittain tehtävänä kirjauksena olisi pumpun kuluttama ulkopuolinen sähköenergia, jota voitaisiin vertailla myöhemmin vuosittain erilaisten vuosittaisten lämmitystarpeiden ohessa. Sähköä kuluttavat myös kiertovesipumput, mahdolliset magneettiventtiilit sekä automatiikan mahdollistava ohjauselektroniikka. Näiden osuutta on myös syytä arvioida, niiden tosin ollessa aika pienet kompressorin verrattuna.

Kompressorin ottamalle sähköteholle voidaan kirjoittaa yhtälö:

$$P = q_m \cdot \Delta h / \eta_{sm}, \quad (12)$$

jossa η_{sm} on kompressorin sähkömoottorin hyötysuhde, q_m on kylmäaineen massavirta ja Δh ominaisentalpian muutos.

Todelliselle lämpökertoimelle pätee yhtälö:

$$COP = \Phi_{hs} / (P_k + P_a), \quad (13)$$

jossa Φ_{hs} on hyödyksi saatu lämpöteho, johon kuuluu osa pumppausenergiasta ja kompressorin lämpöhäviöistä, P_k on kompressorin ja P_a apulaitteiden teho.

4.3 Laskeminen toteutuneen kulutuksen avulla: esimerkkinä omakotitalo

Hartman

Työhön otettiin mukaan vertailun vuoksi todellinen kohde, omakotitalo, joka sijaitsee Padasjoella, Päijät-Hämeessä. Esimerkin avulla ymmärretään ne useat lopputulokseen vaikuttavat epävarmuustekijät, joita samantyyppisissä todellisten lämpöpumppujärjestelmien yhteydessä on. Laskelmat on tehty epätarkoin lähtötiedoin, eikä laskelmissa pyritäkään suureen tarkkuuteen. Laskelmien perusteena olevia vuosikulutuksia ei ole normeerattu. Rakennuksessa aikaisemmin ollut öljylämmitys vaihdettiin maalämpöpumppulämmitykseen 12.5.2010. Maalämpöpumppu on IVT PremiumLine X11 osatehopumppu. Lämpöpumpun sähkönsyöttöön on asennettu kWh-mittari.

Rakennuksessa oli aikaisempi öljynkulutus vuositason keskimäärin 3000 litraa vuodessa. Vanhan öljykattilan hyötysuhteeksi arvioidaan 75 %. Kun lämmitysöljyn sisältämä energia on noin 10 kWh/litra, saadaan lämmitysenergian tarpeeksi vuositason keskimäärin 22500 kWh ($3000 \text{ l/v} \cdot 10 \text{ kWh/l} \cdot 0,75 = 22500 \text{ kWh/v}$). Aluksi vuonna 2007 talon omistaja H. Hartman asennutti ilmalämpöpumpun, jonka tuottaman ilmaisenergian hän arvioi 7250 kWh:ksi vuodessa, kun taloussähkön kulutus samaan aikaan kasvoi 2500 kWh vuodessa. Öljyn kulutus pieneni 1700 litraan. Ilmalämpöpumpun luovuttama lämpö lasketaan $1300 \text{ l/v} \cdot 10 \text{ kWh/l} \cdot 0,75 = 9750 \text{ kWh/v}$. Jäljelle lämmitysenergiaan ja käyttöveden lämmittämiseen jää 15250 kWh/v ($22500 - (9750 - 2500)$). Vuoden käytön jälkeen maalämpöpumppu oli kuluttanut 6914 kWh sähköenergiaa. Ilmaisenergiaa maasta oli saatu 8336 kWh (Hartman 2011).

Ilmalämpöpumpun vuosihyötysuhde SPF-arvo lasketaan:

$$9750 / 2500 = 3,90.$$

Maalämpöpumpun SPF-arvo lasketaan:

$$15250 / 6914 = 2,21.$$

Maalämpöpumpun SPF-arvo on valmistajan ilmoittamaan arvoon 2,7 verrattuna pieni. SPF-arvolla 2,7 olisi sähkönkulutuksen pitänyt olla 5648 kWh vuodessa. Tämä esi-

merkki mielestäni osoittaa laskennan epämääräisyyden, kun eri lähtöarvot eivät ole tarkkoja ja itse mittausjaksojen aikana tehdään muitakin energiankulutukseen vaikuttavia toimenpiteitä. Markkinoilla kiertää lukuisia eri näkemyksiä maalämpöpumppujen todellisista lämpökertoimista. On perustettu lämpöpumppufoorumi–niminen keskustelupalsta, jossa kävijät voivat jakaa tietoa ja kysellä muilta kävijöiltä mieltä askarruttavia aiheita. Esimerkki Hartmanin tyyppisiä karkeita laskelmia tehdään paljon, osan näyttäessä hyviä tuloksia, osan huonoja tuloksia lämpökertoimen kannalta.

4.4 Teoreettinen ja käytännön laskeminen oppimisympäristössä

COP-arvon hetkellisen arvon laskennalla saadaan tarkempia arvoja kuin vuositasolla tehtävässä laskennassa. Laskelmiin voidaan ottaa mukaan tarkempia lopputulokseen vaikuttavia ulkoisia tekijöitä, ja kaikki laskentaan vaikuttavat mittaukset voidaan järjestää tarkemmiksi.

TAMKin oppimisympäristöön on tehty mittauksia, joilla opiskelijoille saadaan laadittua kylmähöyryprosessin ja lämpökertoimien laskennan ymmärtämiseen auttavia tehtäviä. Oppimisympäristö palvelee niin LVI-alan kuin sähkötekniikankin opiskelijoita. LVI-alan tuleville insinööreille on tärkeätä ymmärtää kylmäteknikan perusteet ja kylmähöyryprosessin kulku. Maalämpöpumpun ympäriltä on poistettu peltikuoret, mikä mahdollistaa käsiksi pääsyn prosessin eri komponentteihin ja manuaaliset lämpötilojen mittaukset. Sähkötekniikan opiskelijat voivat lisäksi arvioida kompressorin ja apulaitteiden sähkönkulutusta ja niiden vaikutusta lämpökertoimiin, sekä tutustua Vista-kiinteistövalvomoon todellisten mittausten avulla.

5 TAMKIN OPPIMISYMPÄRISTÖ

5.1 Oppimisympäristön laitteet

TAMKin Kuntokadun I-siiven eteläpuolelle porattiin 135 m syvä kalliokaivo ja asennettiin erilliseen mittaushuoneeseen maalämpöpumppulaitteet vuoden 2011 alussa. Järjestelmään liitettiin useita erillisiä mittausantureita, joista osa kytkettiin Schneider Electricin toimittamaan TAC Vista-kiinteistövalvomoon. Järjestelmässä olleita puutteita on korjattu ja täydennetty vielä syksyn 2011 aikana. Tämän työn yhteydessä on huomattu järjestelmään lisämittaustarpeita, jotka on raportoitu TAMKin opettajille. Talven 2012 lämmityskauden aikana on epäilty, että porattu syvyys 135 m on liian vähän lämpökaivosta haluttuun tehoon nähden. Lämpötila kaivossa on laskenut alemmaksi kuin alun perin toivottiin, ja lämmönottoa varaajasta on rajoitettu.

Mittaushuoneeseen on sijoitettu maalämpöpumppu ja varaaja (tasaussäiliö) mittauslaitteineen. Samassa huoneessa ovat myös energia- ja ympäristötekniikan oppimisympäristön muut energiatekniikan laitteiden lämpöputket mittauslaitteineen. Tuulivoimalat, aurinkokeräimet ja –paneelit sijaitsevat tilan yläpuolella katolla. Maalämpöpumpusta ja aurinkokeräimistä kerätään lämpö samaan isoon 800 l varaajaan, josta lämpöä käytetään I-siivessä sijaitsevassa kasvihuoneessa ja puutyöverstaassa.

Maalämpöpumppu Lämpöässä T10

Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy:n valmistama malli on tulistustekniikalla varustettu täysitehoinen maalämpöpumppu, joka käyttää kylmäaineena R407C:tä, jonka p,h-diagrammi on liitteessä 1. Lämpöässä esitteen teknisten tietojen mukaan mallin T10 antoteho on +35 °C:ssa 11,4 kW, ja +50 °C:ssa 10,6 kW. Ottoteho on vastaavasti +35 °C:ssa 2,4 kW, ja +50 °C:ssa 3,3 kW. Tekniset tiedot eivät kerro sähkökulutuksen jakautumista kompressorin ja muun kulutuksen välillä. Pumppujen kilvistä voidaan lukea maapiirin pumpun maksimitehoksi 550 W ja varaajaan vievien putkilinjojen pumppujen tehoiksi 25 W ja 30 W. Ohjauselektronikan tehonkulutukseksi voidaan arvioida 20 W. Yhteensä muu sähkönkulutus kuin kompressorin kuluttama on maksimissaan 625 W.

Kompressorin moottorin tehontarve muuttuu kylmäaineen lämpötilan funktiona (Nydal 2002, 157).



KUVA 10. TAMKin oppimisympäristön Lämpöässä T10 maalämpöpumppu (Kuva: Jani Haka 2012)

Tulistustekniikalla voidaan tuottaa kuumaa lämmitysvettä ympäri vuoden ilman sähkövastusta. Tekniikka vaatii erillisen varaajan. Laitteessa on 3 erillistä lämmönvaihdinta. Maapiirin vaihdinta, jossa kylmäaine muuttuu kaasuksi, nimitetään höyrystimeksi. Kuumasta kaasusta lämpöä ottavaa vaihdinta sanotaan tulistusvaihtimeksi. Se ottaa tulistetusta kylmäainekaasusta pienen osan lämpöä, joka ohjataan varaajan yläosaan. Suurin osa lämmöstä siirtyy varaajaan lauhduttimeksi kutsutun vaihtimen kautta. Siellä kaasu muuttuu nesteeksi ja lauhtuu (Maalämmöllä 2010, 6).

Laitteeseen kuuluu mukaan oma ohjausyksikkö, jossa voidaan tehdä tarvittavat ennakkoasetukset, sekä seurata järjestelmän omia mittaustuloksia. Ohjausyksikkö on suomalaisen Ouman Oy:n valmistama malli 201 GT. Se mittaa useita eri lämpötiloja ja ohjaa näiden perusteella lämpöpumpun prosessia. Näytön mukaisesti käyttäjä voi tarkistaa menoveden, ulkoilman, varaajan yläosan, varaajan alaosan sekä kuumakaasun lämpötilat. Lämpökertoimien laskemiseksi on tärkeää, että järjestelmästä voidaan lukea kompressorin käyntiaika. Oikein optimoidun lämpökertoimen saamiseksi on ehdottoman tärkeää tehdä ohjausyksikön kautta asetukset omaa käyttöä vastaaviksi (Saksi, 2012).

TAMKin maalämpöpumpusta on jätetty pois peltikuoret, jotta laitteen komponentteihin ja putkiin päästään käsiksi helposti. Kylmähöyryprosessin eri vaiheiden mittaaminen esim. tilapiirroksen piirtämiseksi voidaan järjestää tarvitsematta purkaa mitään. Tiedot ohjausyksiköstä eivät välity eteenpäin.

Iskra kWh-mittari

Sähkön syötön yhteyteen asennettiin erillinen 3-vaihe kWh-mittari syksyllä 2011. Laite on slovenialaisen valmistajan Iskran malli MT375. Mittari lähettää mitaamansa tiedon GSM-modeemin avulla Rejlers Oy:n etävalvomoon. Maalämpöpumpun kuluttaman sähköenergian mittaus on eri hyötysuhteiden laskemisen kannalta aivan ehdoton edellytys. Oppimisympäristön maalämpöpumpun yhteyteen on tässä työssä ideoitu erillinen kompressorin sähkönkulutuksen alamittaus, jonka avulla voidaan tarkemmin tehdä mitauksia ja laskelmia todellisista kulutuksista ja lämpökertoimista.



KUVA 11. Iskra kWh-mittari (Kuva: Jani Haka 2012)

Kamstrup Multical 801 energian laskijalaite

Varaajan tulo- ja menoputkiin on kytketty 2 erillistä energian laskijalaitetta Multical 801, jotka on valmistanut tanskalainen Kamstrup. Varaajan alaosaan menevien putkien mittaamista tekee Kamstrup 1 ja yläosaan Kamstrup 2. Laskijoiden toiminta perustuu antureihin, jotka mittaavat virtausta, sekä tulo- ja menoputken välistä lämpötilaa. Näistä menoputken varaajaan luovuttama energia lasketaan kaavalla:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (14)$$

jossa m on massa [kg], c_p on veden ominaislämpökapasiteetti 4,2 kJ/kgK ja ΔT [K] on tulo- ja menoputken lämpötilaero.

Multical 801 mittaa veden virtausta, joten käytetään massan m tilalla virtausta m^3/h ja muunnosta joulesta kilowattituntiin, joka on käyttökelpoisempi yksikkö tehon laskemisessa.

$$\Phi = q_v \cdot c_v \cdot \Delta T, \quad (15)$$

jossa q_v on tilavuusvirta [m^3/h], c_v on vakio 1,167 kWh/ m^3K ja ΔT [K] on tulo- ja menoputken lämpötilaero.

Laskijalaitteet mittaavat varaajan ylä- ja alaosiin meneviä tulo- ja menoputkia erikseen. Näin ollen mittareista on laskettava energiat yhteen haluttaessa lämpöpumpun luovuttama kokonaisenergia. Mittaustietoja ei lähetetä mihinkään.

Kamstrup 9EVL lämpöenergia- ja virtausmittari

Mittaria käytetään mittaamaan kalliokaivoon menevän ja palaavan putken energiaa ja virtaamia. Se mittaa tuodun energian (E) ja liuosmäärän (V), hetkellistehon (P) ja virtauksen (q) ja niiden huippuarvot (P_{\max} , q_{\max}) sekä meno- (t_1) ja paluulämpötilan (t_2). Nämä tiedot eivät välity mihinkään. Kun lämmönsiirtoaineena on etanoliliuos, ei liuoksen ominaislämpökapasiteetti ole sama kuin puhtaalle vedelle. Etanolin ominaislämpö-

kapasiteetti on 2,44 kJ/kgK. Lasketaan liuoksen ominaislämpökapasiteetti seuraavalla kaavalla:

$$c_{\text{liuos}} = x \cdot 2,44 + (1 - x) \cdot 4,2, \quad (16)$$

jolloin saadaan 35 % liuokselle ominaislämpökapasiteetti 3,584 kJ/kgK eli 0,996 kWh/m³K.

Maaperästä otettu teho lasketaan:

$$\Phi = q_m \cdot c_{\text{liuos}} \cdot \Delta T, \quad (17)$$

jossa q_m on massavirta [kg/s], c_{liuos} on vakio 3,584 kJ/kgK ja ΔT [K] on tulo- ja menoputken lämpötilaero.

Kun Kamstrup 9EVL ilmoittaa mittauksensa tilavuutena ja kilowattituntina, käytetään massavirran tilalla tilavuutta m³ ja muunnosta joulesta kilowattituntiin, joka on käyttökelpoisempi yksikkö. Maapiiristä saatava lämpöenergia lasketaan:

$$Q = V \cdot c_v \cdot \Delta T, \quad (18)$$

jossa V on tilavuus [m³], c_v on vakio 0,996 kWh/m³K ja ΔT [K] on tulo- ja menoputken lämpötilaero.

Carel, erillinen paineen ja lämpötilan mittauslaite

Maalämpöpumpun oman ohjausyksikön lisäksi oppimisympäristöön on haluttu tehdä lisämittauksia, joita varten maalämpöpumpun kylmäainepuolelle on lisätty lämpötilaa ja painetta mittaavia antureita. Näitä voidaan tarkastella näytöltä, jossa näkyy höyrystymis- ja lauhtumispaineet, sekä 3 lämpötilaa, jotka ovat imulinjan, nesteen ja huonetilan lämpötilat. Nämä tiedot eivät välity mihinkään.

Schneider TAC Vista-kiinteistövalvomo

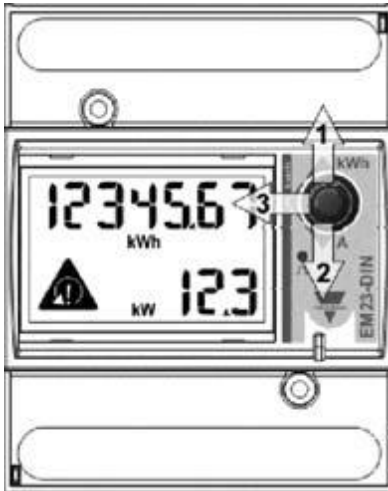
TAC Vista kiinteistöautomaatio-ohjelmisto on järjestelmä, jonka piiriin voidaan liittää kaikki kiinteistön talotekniikkaan liittyvät toiminnot, kuten lämmitys ja jäähdytys, kulunvalvonta ja turvallisuus, paloilmoinjärjestelmä ja valaistus. Yhdestä käyttöliittymästä voidaan hallita useita kiinteistöjä ja kaikkia näiden tiloja ja huoneita.

TAMKin energiatekniikan oppimisympäristön laitteista osa on kytketty suoraan Vista-kiinteistövalvomoon. Käyttäjä saa näytölle grafiikkakuvan, eli kaavion, jossa näkyvät maalämpöpumppu, kalliokaivo, varaaja ja näiden väliset putket. Liittynyt aurinkokennät ja kasvihuoneen lämmitysjärjestelmään myös näkyvät. Maalämpöpumppujärjestelmään on liitetty useita antureita, jotka mittaavat lämpötiloja ja paineita. Näistä osaa voidaan käyttää tämän työn laskelmissa. Tulevaisuuden harjoitustöissä tai jopa opinnäytetöissä aiheena voisi olla uusien mittausten lisääminen ja käsittely Vista-kiinteistövalvomossa.

Kompressorin sähkönkulutuksen mittaus

Työn tekemisen aikana selvästi tuli esille tarve mitata erikseen kompressorin sähkönkulutus. Maalämpöpumpun koko sähkönkulutusta mittaava Iskran kWh-mittari laskee kaiken yhteen, eikä erittele eri komponenttien osuuksia. Lämpökertoimen laskemisessa on kompressorin sähkönkulutus oleellinen lähtötieto. Myös oppimistehtävien kannalta on tärkeää ymmärtää mm. lämpötilan vaikutus kompressorin tehoon.

Liitteessä 3 on ehdotus mittauskytkennästä, jolla voidaan erikseen mitata kompressorin sähkönkulutus. Markkinoilta etsittiin soveltuvia kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja kWh-mittareita. TAMKin OPI ENEMPI –oppimisympäristön maalämpöpumpun yhteyteen soveltuvimmaksi valittiin Carlo Cavazzin valmistama malli EM23-DIN, joka on ilman N-kytkentää oleva 3-vaiheinen kiskoon kytkettävä mittari. Siinä on etäluentamahdollisuus pulssilähtönä, jota pidettiin tärkeänä ominaisuutena tulevaisuuden harjoitustöitä silmällä pitäen. Kytkennässä Iskra MT375 toimii päämittarina, johon liitettävään pulssikeräimeen P2M alamittari EM23-DIN lähettää mitaamansa kWh-tiedon. MT375 lähettää tiedon Rejlersin Etävalvomoon.



KUVA 12. Kompressorin tehonkulutuksen kWh-mittari Carlo Cavazzi Em23-DIN

5.2 Mittaaminen oppimisympäristössä

Mittaukset ja niistä saatavat tulokset voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan. Ensimmäisenä ovat kylmähöyryprosessin eri vaiheista tehtävät lämpötilan ja paineiden mittaukset. Nämä saadaan Carelista ja Lämpöässä näytöltä, sekä manuaalisesti mittaamalla esim. lämpötiloja putkien ja komponenttien pinnalta. Toisena ovat lämmönsiirtoon liittyvät virtausten ja lämpötilojen mittaukset. Molemmista saadaan laskettua hyötysuhteisiin ja lämpökertoimiin liittyviä arvoja.

5.3 Laskeminen kylmähöyryprosessista

Ensimmäiseksi voidaan laskea prosessin teoreettinen Carnot-lämpökerroin ε_{CK} kaavan 7 mukaisesti. Carelista saadaan lauhtumis- ja höyrystymispaineet, joita vastaavat lämpötilat saadaan taulukosta tai tilapiirroksen avulla.

TAULUKKO 3. Maalämpöpumpun kylmähöyryprosessin paineet

Mittaus	Lauhtumispaine /bar	Höyrytymispaine /bar
13.12.2011	21,8	3,2
11.1.2012	21,4	3,2
18.1.2012	20,1	3,3
Keskiarvo	21,2	3,23
Lämpötila	320 K	258 K

$$\varepsilon_{CK} = 320 / (320 - 258) = 5,16$$

Seuraavaksi lähdetään piirtämään kylmäaineen R407C p,h-diagrammiin tilapiirrosta niiden mittaustulosten avulla, jotka saadaan jo valmiiksi tehdyistä mittaussjärjestelyistä. Käytetään tässä hyväksi kuvan 9 kylmähöyryprosessin eri vaiheiden merkintätapaa. Ensimmäiseksi tilapiirroksen merkitään lauhtumis- ja höyrytymispaineet, jotka saadaan Carelista. Maalämpöpumppujärjestelmän kannattaa antaa olla käynnissä jonkin aikaa, jotta lämpötilat ja paineet tasaantuvat ja prosessi voi kiertyä tasaisesti.

Tilapiirroksen piirretään paineviivat, joihin seuraavaksi haetaan pisteet 4, 5, 1 ja 2. Nämä saadaan käyttäen hyväksi Carelin lämpötilamittauksia.

TAULUKKO 4. Maalämpöpumpun kylmähöyryprosessin lämpötilat

Mittaus	Lämpötila / °C, piste 4	Lämpötila / °C, piste 1	Lämpötila / °C, piste 2
13.12.2011	48,6	2,3	110
11.1.2012	47,8	2,6	108
18.1.2012	45,2	3,8	102
Keskiarvo	47,2	2,9	107

Piste 4 on lauhtumispaineviivalla kohdassa, jossa lämpötila on 47,2 °C. Piste 5 saadaan pisteestä 4 piirtämällä pystysuora viiva alaspäin höyrytymispaineviivalle. Piste 1 saadaan piirtämällä se höyrytymispaineviivalle kohtaan, jossa lämpötila on 2,9 °C. Piste 2 saadaan Lämpöässä näytöltä kohdasta kuumakaasu. Lauhtumispaineviivalle piirretään piste kohtaan, jossa lämpötila on 107 °C. Tilapiirros on tehty kylmäaineen R407C p,h-diagrammiin liitteessä 1.

Seuraavaksi lasketaan entalpian kasvu höyrystimessä. Se saadaan tilapiirroksista vähentämällä pisteen 1 entalpiasta h_1 pisteen 5 entalpia h_5 : $h_h = (420 - 265) \text{ kJ/kg} = 155 \text{ kJ/kg}$.

Prosessin massavirta lasketaan:

$$q_m = \Phi_o / h_h \quad (19)$$

jossa Φ_o on prosessin höyrystinteho [kW] ja h_h on entalpian kasvu höyrystimessä [kJ/kg]. Höyrystinteho saadaan vähentämällä valmistajan ilmoittamasta antotehosta 10,6 kW ottoteho 3,3 kW. Saadaan silloin höyrystintehoksi 7,3 kW.

$$q_m = 7,3 \text{ kW} / 155 \text{ kJ/kg} = 0,047 \text{ kg/s}.$$

Entalpian kasvu kompressorissa saadaan laskemalla tilapiirroksista:

$$h_2 - h_1 = h_K = (495 - 420) \text{ kJ/kg} = 75 \text{ kJ/kg}.$$

Voidaan laskea kylmähöyryprosessin lämpökerroin, kun häviöitä ei oteta huomioon.

Kaavaan 8 sijoitetaan:

$$\varepsilon_L = \Delta h_L / \Delta h_K = (155 + 75) / 75 = 3,1.$$

Kaavojen 7 ja 8 avulla laskettujen lämpökertoimien suhde $\varepsilon_L / \varepsilon_{CK}$ on normaalisti välillä 0,45...0,55 (Wiksten 1996, 142). Lämpöässä sai arvon $3,1 / 5,16 = 0,60$.

5.4 Laskeminen muilla mittauksilla

Maapiiriin kytketyllä energian laskijalaitteella, varaajaan meneviin putkiin kytketyllä lämpöenergia- ja virtausmittareilla sekä maalämpöpumpun sähkönsyöttöön liitetyllä kWh-mittarilla saadaan tuloksia, joilla voidaan arvioida COP-arvoja.

TAULUKKO 5. Lukemat lämmön siirron mittauksista

	Mittaus	Kamst- rup1 /Energi a/ MWh	Kamst- rup2 / Energia / MWh	Komp- ressori- aika / h	Iskra /kWh
1.	13.12.2011	5,44	0	2117	548
2.	11.1.2012	7,44	2,54	2692	2660
3.	18.1.2012	7,94	3,25	2846	3235

Mitattujen energioiden, kompressorajan ja kulutetun sähköenergian avulla voidaan laskea COP-arvoja. Maapiiriin kytketyllä energian laskijalaitteella saadaan mittaustuloksia, joilla voidaan laskea maasta saatavan ilmaisenergian määrä, ja sen suhde kulutettuun sähköenergiaan ja varaajaan luovutettuun lämpöenergiaan:

TAULUKKO 6. Lasketut COP-arvot

Mittaus	Siirretty lämpö /MWh	Iskra / kWh	kompressoriaika / h	COP-arvo
1. – 2.	4,54	2112	575	2,15
2. – 3.	1,21	575	154	2,10
1. – 3.	5,75	2687	729	2,14

Tehon mittaukset ovat hetkellisiä tehoja. Keskimääräinen sähköteho on laskettu Iskan mittaamasta kulutetusta sähköenergiasta ja Lämpöässä laskemasta kompressorijasta taulukossa 5:

$$P_{\text{kok}} = W_{\text{kok}} / \Delta t. \quad (20)$$

TAULUKKO 7. Tehon laskenta

	Mittaus	Kamstrup1 /teho/ kW	Kamstrup2 /teho / kW	Sähköteho / kW
1.	13.12.2011	3,3	5,1	3,67
2.	11.1.2012	3,3	4,5	3,73
3.	18.1.2012	3,1	4,8	3,69

5.5 Harjoitustehtävähdotukset opiskelijoille

Oppimisympäristönä maalämpöpumppujärjestelmä antaa mahdollisuuksia monenlaisille oppimista edistävälle harjoitustehtäville, jotka on jaettu kuuteen eri ryhmään. Tehtävät ovat liitteessä 3. Seuraavaksi on käyty läpi eri osa-alueisiin liittyvät tehtävät.

Maalämpöpumpun eri toiminnalliset osat ja komponentit

Maalämpöpumpun toiminnan ymmärtämiseksi on käytävä läpi kaikki ne komponentit ja niiden mahdolliset kombinaatiot, jotka on toimivan kylmähöyryprosessin aikaansaamiseksi oltava. Kun ei ole olemassa vain yhtä tapaa saada prosessi toimimaan, on myös ymmärrettävä erilaiset tavoitteet ja vaihtuva toimintaympäristö. Lämpöpumppuja suunnitellaan useilla eri toiminnallisilla periaatteilla. On osatehopumppuja ja täystehopumppuja. Kylmäaineita on lukuisia käytössä olevia. Alijäähdytystä ja tulistusta käytetään monin eri tavoin. TAMKin oppimisympäristön maalämpöpumppu on täystehoinen imukaasun lämmönsiirrintä käyttävä lämpöpumppu. Siinä on kaikki nykyaikaisen lämpöpumpun tärkeimmät komponentit. Tehtävillä opitaan kylmäteknikassa käytettävien nykyaikaisten ja tehokkaiden komponenttien toiminta ja ominaisuudet.

Kylmähöyryprosessin toiminta

Opiskelijan ensimmäisenä tehtävänä on selvittää teoriaosuus, joka liittyy kylmälaitteisiin ja lämpöpumppuihin. Kylmä- ja lämpökertoimen laskeminen ja niiden keskinäinen suhde käydään läpi. Tärkeätä on, että opiskelijat ymmärtävät kylmähöyryprosessiin liittyvät komponentit; lauhdutin, höyrystin, kompressorin sekä paisuntaventtiili, ja osaavat sijoittaa ne prosessin kannalta oikeaan järjestykseen. Lisäksi on ymmärrettävä faasimuutoksen merkitys lämpökertoimen muodostumiseksi. Opiskelijan on osattava arvioida paineita ja lämpötiloja eri komponenttien välillä, ja niiden muuttuminen prosessin eri vaiheissa.

Tilapiirros

Jotta teoria ei ole liian puuduttavaa, on hyvä käydä läpi tilapiirros ja sen avulla mahdollisesti tehtävät laskut. Opiskelija osaa sijoittaa tilapiirrokseen eri osaprosessit, hakea oikeat pisteet muutoksille, ja ymmärtää yhden suuren muutoksen vaikutuksen muihin suureisiin. Entalpian käyttöä opiskelijalle, mahdollisesti kokonaan uutena suurena, ei voi vähätellä: siihen liittyviä laskuja kannattaa harjoitella perusteellisesti. Myös muut tilapiirroksista löytyvät suureet paine, lämpötila, vakioentropia, ominaistilavuus ja höyrystyskäyttö käydään läpi laskuissa.

Järjestelmästä tehtävät mittaukset

Maalämpöpumppujärjestelmään on valmiiksi tehty useita mittausmahdollisuuksia. Lisäksi lämpötiloja voidaan mitata avoimen rakenteen takia erillisellä mittarilla. Opiskelijat selvittävät, mitkä mittaukset ovat merkityksellisiä kylmähöyryprosessin ymmärtämiseksi. Maalämpöpumpun kytkentä maapiiriin ja varaajaan tulee käytyä läpi, sekä laskelmat virtaamista, tehoista ja lämpömääristä.

COP-arvon ja vuosittaisen lämmöntuoton laskenta

Lämpökertoimen, COP-arvon, SPF-arvon ja yleensäkin hyötysuhdekäsitteen ymmärtäminen on koko kylmätekniikan perusta. Opiskelijan täytyy omaksua termodynamiikan ensimmäinen ja toinen perussääntö. Kaikki erilaiset tavat laskea näitä lukuarvoja käydään läpi käyttäen hyväksi oppimisympäristön tarjoamia mahdollisuuksia. Tehtävien avulla voidaan verrata eri tapojen tuloksia ja niiden mahdollisia eroja.

Maalämpöpumpun taloudellisuus

Koska lämpöpumppujen suuri mahdollisuus on niiden tuoma ilmaisenergian hyödyntäminen, on hyvä tehdä myös taloudellisuuskalkelmia niin, että ymmärretään laskelmien tärkeys oikean kokoisen ja tehoisen lämpöpumpun valitsemiseksi. Maalämpöpumppumyyjät käyttävät hyväksi testattua ja loogista tapaa edetä laskelman tekemisessä. Heillä on käytössään tietokoneohjelmia, jotka tekevät laskelman nopeasti. Opiskelija tekee laskelmat manuaalisesti, jotta laskelmaan vaikuttavat tekijät tulevat käytyä läpi oikeassa järjestyksessä. Julkisuudessa keskustellaan usein takaisinmaksuajoista. Tehtävissä on hyvä sivuta käsitettä, jotta ymmärretään sen yhteys korkoon, jolla investointi maksetaan.

6 TULOKSET

6.1 TAMKin maalämpöpumpun COP-arvo

Mittauksista ja laskelmista on saatu useita erilaisia lämpökertoimia ja COP-arvoja. Ovatko ne vertailukelpoisia keskenään, on pohtimisen arvoista. Jos eroja syntyy eri laskutavoilla, mistä voivat erot johtua? Juuri nämä erot ja niiden syyt ovat opiskelijoille erinomaisia aiheita harjoitustehtäviksi. Kuluttajien kannalta epätietoisuutta on aiheuttanut tämä lämpökertoimiin liittyvä käsitteiden epämääräisyys.

Kylmähöyryprosessista laskettava lämpökerroin on todellisuudessa hieman epätarkka muutamien syiden takia. Tilapiirroksessa on aina pieni mahdollisuus piirtää viivat väärään kohtaan, jolloin oordinaatasta tai abskissasta arvioitu entalpia tai paine ei ole aivan oikea. Massavirran laskeminen on epätarkka, sillä sen lähtötietona on höyrystymisteho, joka arvioitiin valmistajan antamien tietojen perusteella. Lämpöässä teknisistä tiedoista saatiin antotehoksi 10,6 kW, joka mittausten perusteella on liian suuri. Kun antotehosta vähennettiin teknisten tietojen antama ottoteho 3,3 kW, saatiin höyrystymistehoksi 7,3 kW.

Maapiirin ja varaajan lämpömäärään liittyviä mittauksia ja tuloksia työn tekijä pitää melko luotettavina, sillä niissä virheen mahdollisuus on pienempi. Tällöin Lämpöässä pystyy luovuttamaan varaajaan maksimissaan 8,6kW, mitatuilla kolmella mittausjaksolla. Paras COP-arvo oli 2,15, kun Lämpöässä asetuksiin on varaajaan menevän veden lämpötilaksi asetettu +55 °C.

6.2 Oppimisympäristön käyttö opiskelijoiden harjoituksiin

TAMKin energiatekniikan oppimisympäristö on aivan erinomainen väline oppia maalämpöpumpun toimintaa. Kun maalämpöpumppujärjestelmä saadaan optimoitua oikeille asetusarvoilleen ja oikeille tehoille, paranee myös COP-arvo kohti valmistajan lupaamia arvoja. Opiskelijat pystyvät tekemään kaikki oleelliset mittaukset valmiiksi asennetuista

mittauksista sekä manuaalisesti mitaten. Tehtävien harjoitustöiden ja laskelmien avulla opiskelijat saavat käsityksen kylmähöyryprosessin ja maalämpöpumpun toiminnasta.

Olisi ollut mielenkiintoista tutkia kompressorin kierrosluvun säätämistä taajuusmuuttajan avulla, mutta niitä ei täystehopumpuissa käytetä. Sähköisiä mittauksia kannattaa kehittää tulevaisuudessa, niin että kompressorin ja eri komponenttien osuuksia kokonaissähkökulutuksesta voidaan arvioida. Toisaalta, kun eri komponenttien osuutta kokonaissähkökulutuksesta joutuu pohtimaan ja selvittämään, on se itsessään opettavaa. Harjoitustehtävät toistaiseksi painottuvat enemmän kylmäteknikan puolelle: sähkötekniikan opiskelijoille on vähemmän tehtäviä. Työssäni ehdottama kompressorin virran ja tehonkulutuksen mittausta antaa mahdollisuuksia arvioida höyrystymislämpötilan vaikutusta moottorin tehonkulutukseen. Voidaan myös arvioida todellista kylmähöyryprosessin lämpökerrointa mitattuun, kun kiertovesipumppujen tehonkulutus saadaan erotettua kompressorin tehonkulutuksesta. Tehtäviä voidaan kehittää tulevaisuudessa hyödyntämään suoraan Vista-kiinteistövalvomon keräämiä tietoa. Tämä vaatii lisää anturointia.

6.3 Huomioita maalämpöpumppujen COP-arvoista

Lämpökertoimen ollessa yksi tärkeimmistä myyntiargumenteista maalämpöpumpuilla, on siihen vaikuttavien tekijöiden ymmärtäminen aivan oleellista. Markkinoilla käydään COP-arvojen suuruuksista aktiivista keskustelua niin keskustelupalstoilla kuin valmistajien ja pumppumyyjienkin kesken. Kuluttajien kannalta on tärkeää, että maalämpöpumput mitoitetaan oikein rakennuksien päälämmitysjärjestelmiksi. Tällöin pelkästään pumppumyyjien lupauksiin luottaminen ei riitä, vaan vaaditaan myös puolueetonta ja intressivapaata tietoa ja neuvontaa. Tuntuu, että Suomessa ilmalämpöpumppujen testausta ja vertailua on tehty jo aika paljon, ja markkinoilla on syntynyt oikeanlainen käsitys ilmalämpöpumppujen ominaisuuksista ja käytöstä lisälämmityslaitteena. Maalämpöpumppumarkkinoiden vielä ollessa kehitysvaiheessa, ei luotettavaa ja riittävän pitkää testaustietoa ole olemassa.

Vaikka maalämpöpumppuvalmistajille on pumppujen testaukseen standardi SFS-EN 14511, jolla itse pumpun ominaisuuksia saadaan verrattua, vaikuttaa lämpöpumpun todelliseen COP-arvoon monia lämpöpumpun ulkopuolisia tekijöitä. Näitä ovat mm.

maapiiri ja lämmönjako. Kallioon porattaessa ei voida etukäteen tietää kallioperän laatua. Tällöin kalliokaivon syvyydellä on iso merkitys kalliosta saatavan tehon muodostumiselle. Lämmönjakojärjestelmän ja sen, miten rakennuksessa asuvat ihmiset kuluttavat käyttövetä ja lämmittävät taloa, vaikutus maalämpöpumpun toimintaan on merkittävä. Maalämpöpumpulla on sen itsensä suunnittelun ja valmistuksen hyvyteen perustuva COP-arvo. Mutta samaan aikaan sen käytölle voidaan laskea vuosittainen SPF-arvo, johon vaikuttaa kuluttajien lämmönkäyttö ja rakennuksen vuosittainen ilmasto- ja sääolosuhteista johtuva lämmöntarve.

6.4 Maalämpöpumppujen vaikutus sähkönkulutukseen valtakunnallisesti

Kovilla pakkasilla sähköverkot ovat lujilla suuresta energiantarpeesta johtuen. Osatehoiset lämpöpumput muuttuvat pääosin sähkölämmitykseksi, kun huipputeho leikataan suoralla sähköllä. Täystehopumppujen tuoma kuormitus on helpommin ennustettavissa. Kun kyseessä ei ole pelkästään verkostomitoitus, asia ei olekaan helposti hoidettavissa, vaan sähkön kuormitushuiput edellyttävät hiiltä käyttävien voimalaitosten käyttöönottoa. Normaalisti sähköntuotannosta suurin osa on vähän päästöjä tuottavaa vesi- ja ydinvoimaa. Hiiltä käyttävien varavoimalaitosten käyttöönotto moninkertaistaa päästöt ilmakehään. Uusiutuvan energian velvoitepaketin mukaisesti myös yhteistuotanto- ja varavoimalaitoksissa siirrytään entistä enemmän käyttämään bioenergiaa tavoitteiden mukaisesti vuoteen 2020 mennessä, mikä osaltaan vähentää tulevia päästöjä.

Sähkömarkkinoilla on Suomessa tapahtumassa suuria muutoksia siirryttäessä älykkääseen sähköverkkoon, jonka yhtenä osana ovat etäluettavat mittarit. palveluna kuluttajille on kaavailtu mahdollisuutta ostaa sähköä hintaportain; siirtymistä kysyntäjoustoon. Sähkönkulutuksen ollessa kovimmillaan, olisi hintakin korkeampi. Vastaavasti valtakunnallisesti pienemmän kulutuksen aikana sähkön hinta olisi alhaisempi. Tämän vaikutus on se, että maalämpölämmittäjät mahdollisesti maksavat korkeita sähkönhintoja silloin, kun lämmitystarve on suurin. Öljylämmityksestä maalämpölämmitykseen siirtävät vanhat rakennukset eivät helposti ja edullisesti pysty vaikuttamaan kokonaisenergiankulutukseensa. Tuleviin rakennuksiin rakentamismääräysten mukaisesti suunnitellaan ja toteutetaan sellaiset rakenteet ja järjestelmät, että ostoenergian määrä on pieni nykymääräysten mukaan rakennettuihin verrattuna. Sähkön tuotanto-, jakelu- ja myyn-

tiorganisaatiot joutuvat miettimään monta asiaa uusiksi, ennen kuin kuluttajien kannalta toimivat hinnoittelujärjestelmät saadaan kehitettyä.

Kun nyt palataan kappaleessa 3 kuvassa 4 esitettyihin arvioihin maalämpöpumppuasenuksista Suomessa, ja verrataan sitä yhden lämpöpumpun arvioituun sähkönkulutukseen, saadaan laskettua mahdollinen lämpöpumppujen kokonaisenergiankulutus. Näiden lisäksi tulee kaikki muista lämpöpumpputyypeistä tuleva kulutus, joka voi olla moninkertainen. Tämä arvio on epätarkka, ja sen tarkoitus on olla suuntaa antava. Suomen koko sähköenergiakulutus vuonna 2010 oli 88 TWh, ja siitä kotitalouksien osuus oli noin 22 TWh. Kun tämä kaikki ei ole lämmitykseen kuluva energiaa, voidaan arvioida, että lämpöpumppujen osuus kotitalouksien sähkönkulutuksesta saattaa olla jopa yli kymmenen prosenttia. Ennusteet ja EU:n tavoitteet ovat, että kokonaissähkönkulutus ei kasva.

TAULUKKO 8. Maalämpöpumppujen energiankulutus vuodessa

Vuosi	Maalämpöpumppuja/kpl	Kulutus/pumppu/kWh	Yhteensä/TWh
2011	62000	7000	0,452
2015	112000	7000	0,784
2020	200000	7000	1,4

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA LOPPUYHTEENVETO

EU:n ja Suomen tavoitteiden mukaisesti uusiutuvan energian käyttöä on lisättävä voimakkaasti monin eri tavoin. Suomessa on ankarat lämmitysolosuhteet ja merkittävä osa kokonaisenergiakulutuksestamme liittyy rakentamiseen ja rakennuksiin. Riippuvaisuus fossiilisista polttoaineista halutaan vähentää samaan aikaan energiaomavaraisuuden lisäämisen kanssa.

Lämpöpumpuilla on iso potentiaali rakennusten lämmitysjärjestelminä. Niin isommissa rakennuksissa kuin pienemmissäkin omakotitaloissa haetaan keinoja siirtyä hyödyntämään maasta saatavaa ilmaisenergiaa. Lämpöpumppujen kysyntä on viimeiset viisi vuotta kasvanut voimakkaasti. Uusissa omakotitaloissa niiden markkinaosuus on jo noin puolet. Isoja kiinteistöjä rakennetaan kallioon porattujen reikien päälle, kun kymmeniä maalämpöpumppuja siirtää lämpöä maaperästä lämmittämään rakennusta. Energian hinnan jatkaessa nousuaan on lämmityskustannusten ennakoidmisella suuri merkitys. Elinkaariajattelun merkityksen ymmärtämisen kasvaessa ollaan valmiita investoimaan järjestelmiin, joilla tulevat käyttö- ja huoltokustannukset ovat nykyistä pienempiä.

COP-arvo, joka kertoo ilmaisen energian suhteen ostoenergiaan, on jo laajemmin ymmärretty tärkeäksi kriteeriksi ostopäätöksessä niin korjausrakentajien kuin uudisrakentajienkin parissa. Sen suuruus maalämpöjärjestelmästä saatavan tehon ja muiden ostokriteerien kanssa on merkittävä investointipäätöksen tekemiseksi. Markkinoilta puuttuu maalämpöpumppuihin liittyvää puolueetonta mittaus- ja laskentatietoa, sekä erityyppisten maalämpöpumppujen vertailutietoa erilaisissa toimintaympäristöissä.

TAMKin energiatekniikan oppimisympäristö on rakennettu opiskelijoita varten, jotta tulevat insinöörit ovat valmiita riittävän hyvin perustiedoin osallistumaan maalämpöpumppujärjestelmien suunnitteluun, käyttöönottoon ja myyntiin. Harjoitustehtävien avulla kylmätekniikan perusteet ja lämpöpumpun ominaisuudet tulevat tutuiksi. Oleellisia harjoituksina ovat lämpökertoimiin liittyvät harjoitukset ja laskut.

Työssä on kahdella periaatteellisella tavalla laskettu lämpökertoimia. Tilapiirroksen avulla voidaan laskea itse lämpöpumpun kylmähöyryprosessiin liittyvät laskut. Mittausten avulla voidaan laskea todellisia maapiirin tuottamia ja varaajaan luovutettuja läm-

pömmääriä. Molemmat tavat opettavat teoriaa, ja auttavat ymmärtämään prosessiin liittyviä häviöitä, joiden pienentäminen on jatkuva haaste. Oppimisympäristössä tehdään samaan aikaan toista harjoitustyötä, jossa arvioidaan tarkemmin kalliokaivon merkitystä COP-arvon muodostumiseen.

Sähkön tuottamisessa ja käytössä ennustetaan tapahtuvan isoja muutoksia. Lähienergian tuottaminen tulee löytämään uusia tapoja, ja rakennusten sähkönkäyttö jakaantuu eri tavalla kuin nyt. Energiatehokkuus ja energian säästäminen saavat isomman merkityksen kuin nyt. Maalämpöpumput käyttävät ja tulevat käyttämään sähköä kuten nytkin. Suoran sähkölämmityksen rinnalla lämpöpumppulämmitys näkyy sähköntuotannolle isona haasteena. Työn tekijän mielestä uusiin maalämpöpumppuasennuksiin pitää liittää aina mukaan maalämpöpumpun kWh-mittaus.

Työn avulla voidaan ymmärtää COP-arvon laskemisen periaatteellinen helppous. Ymmärretään myös, että kun puhutaan lämpökertoimista, on olemassa hetkellisiä ja vuoden aikana laskettuja kertoimia. Näiden kertoimien muodostumiseen vaikuttaa samaan aikaan monet tekijät, joita ovat mm. vuosittainen lämmitystarve, rakennuksen käyttö, käyttäjien tavat sekä oikein tehdyt maalämpöpumpun asetukset. Itse pumppu, maaperän ominaisuudet ja lämpökaivon poraus ovat lähtötekijöitä, joihin ei enää myöhemmin voi vaikuttaa. Moni näistä aiheista olisi oman harjoitustyön arvoinen. Todennäköisesti TAMKin energiatekniikan oppimisympäristössä voidaan tulevaisuudessa tehdä lisää opettavia harjoitustöitä ja laskelmia.

LÄHTEET

Ahola, J., Lindh, T. 2012. Aurinkoenergia on kuluttajan ystävä. Helsingin Sanomat, Vieraskynä. Luettu 15.1.2012.

<http://www.hs.fi/paakirjoitukset/Aurinkovoima+on+kuluttajan+yst%C3%A4v%C3%A4/a1305553388798>

Aittomäki, A. 2001. Lämpöpumppulämmitys. Tampere.

von Baeyer, H. C. 2000. Maxwellin demoni. Miksi lämpö hajaantuu ja aika virtaa eteenpäin. Vantaa: Art House.

Energiateollisuus ry. 2012. Älykäs sähköverkko eli smart grid. Luettu 31.1.2012. <http://www.energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/alykas-verkko>

Fortum Oy. 2011. Maalämmöllä ja biopolttoaineilla lämpöä ja jäähdytysenergiaa Siipoon logistiikkakeskukselle. Tiedote 1.6.2011. Luettu 17.1.2012.

<http://www.fortum.com/fi/media/pages/maalammolla-ja-biopolttoaineilla-lampoa-ja-jaahdytysenergiaa-s-ryhman-sipoon-logistiikkakeskukselle.aspx>

The Guardian. 9.11.2011. World headed for irreversible climate change in five years, IEA warns. Luettu 20.1.2012.

http://www.guardian.co.uk/environment/2011/nov/09/fossil-fuel-infrastructure-climate-change?CMP=tw_t_gu

Hartman, H. Haastattelu Padasjoella 11.10.2011.

Jaakkola, J. Toimitusjohtaja. Pientalorakentamisen kehittämiskeskus PRKK. 2011. Sähköpostikeskusteluja 13.12.2011.

Keski-Suomen liitto, 2012. Taistelu tuulimyllyjä vastaan – ja turvetuotantoa. Luettu 15.2.2012.

<http://www.keskisuomi.fi/nokankoputuksia/article.php?id=&selArticle=117>

Kurnitski, J. 2009. Esitelmä Sulpun kymmenvuotisseminaarissa. Tulostettu 18.10.2011. http://www.sulpu.fi/images/stories/10v_seminaari/sulpu_jarek_kurnitski_esitys_10v.pdf

Laatikainen, T. 2011. Öljy loppuu vuonna 2050. Tekniikka & Talous. Luettu 4.1.2012. <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article198962.ece>

Leppäharju, N. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Fysikaalisten tieteiden laitos, geofysiikka. Oulu: Oulun yliopisto. Pro gradu –tutkielma.

Leppäharju, N. Geofyysikko, Geologian tutkimuskeskus GTK. Sähköpostiviestit 13.10.2010 – 27.10.2010. nina.leppaharju@gtk.fi. Luettu 25.12.2011.

Motiva, 2011. Tuulivoima ja asenteet hankepaikkakunnilla. Tulostettu 15.2.2012. http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/tuulivoima

Nippala, E. 2009. Rakennetun ympäristön energiatehokkuus erikoistumisopinnot. Luentomateriaali, TAMK.

Nydal, R. 2002. Käytännön kylmäteknikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Saksi, H. Suomen lämpöpumpputeknikka Oy. Puhelinkeskustelu 19.1.2012.

Saksi, H. 2009. Kylmäaineen vaikutus pientalomaalämpöpumpun energiatehokkuuteen. Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma, Lämpö- ja virtaustekniikka. Tampere: TUT. Diplomityö.

Senera Oy. Sivusto. Luettu 10.1.2012. <http://senera.fi/Maalampo#9>

Sulpu. 2012. Maalämpöjytky tuli. Viime vuoden kasvu 72%. Tiedote 13.2.2012. Luettu 28.2.2012. <http://www.sulpu.fi/>

Suomen Lämpöpumpputeknikka Oy. 2010. Lämpöässä asiakaslehti 1/2010. Luettu 12.1.2012.

Suomen Ympäristökeskus. 2009. Lämpökaivo, maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Luettu 12.1.2012. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108597&lan=fi>

Tilastokeskus. 2011. Energiatilasto – Vuosikirja 2011. Julkaisu. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ekul/2010/ekul_2010_2011-12-13_kuv_001_fi.html

Tuunanen J. 2009. Lämpöpumppujen vaikutukset sähköverkkoliiketoiminnan kannalta. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta: LUT. Diplomityö.

Työ- ja elinkeinoministeriö. Uusiutuvan energian velvoitepaketti. Julkaisu. http://www.tem.fi/files/26643/UE_lo_velvoitepaketti_Kesaranta_200410.pdf

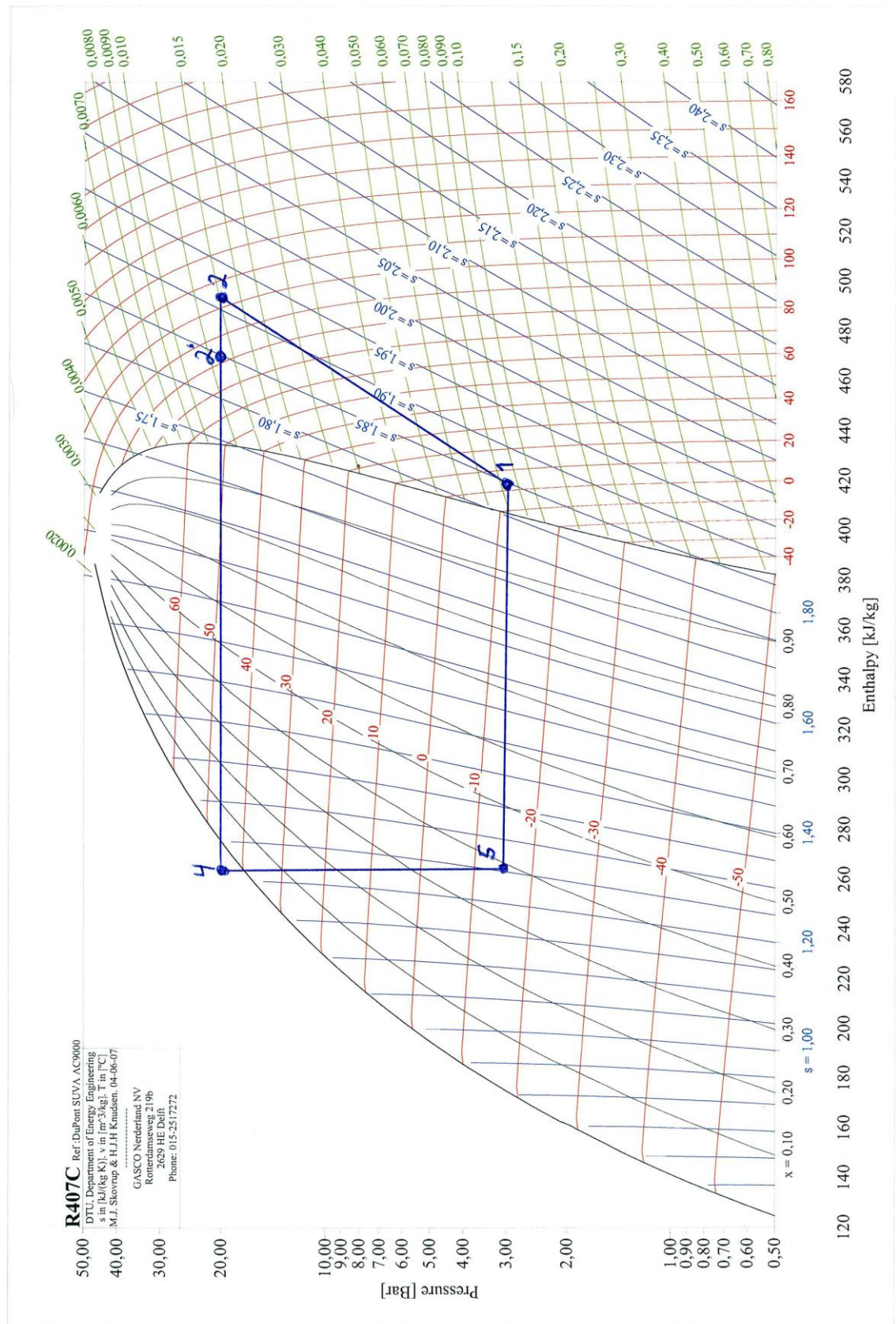
Törmänen, E. 2011. Polttavan kuuma maalämpö. Tekniikka & Talous 9.12.2011. Luettu 9.12.2011.

Wiksten, R. 1996. Lämpövoimaproessit. Helsinki: Otatieto Oy.

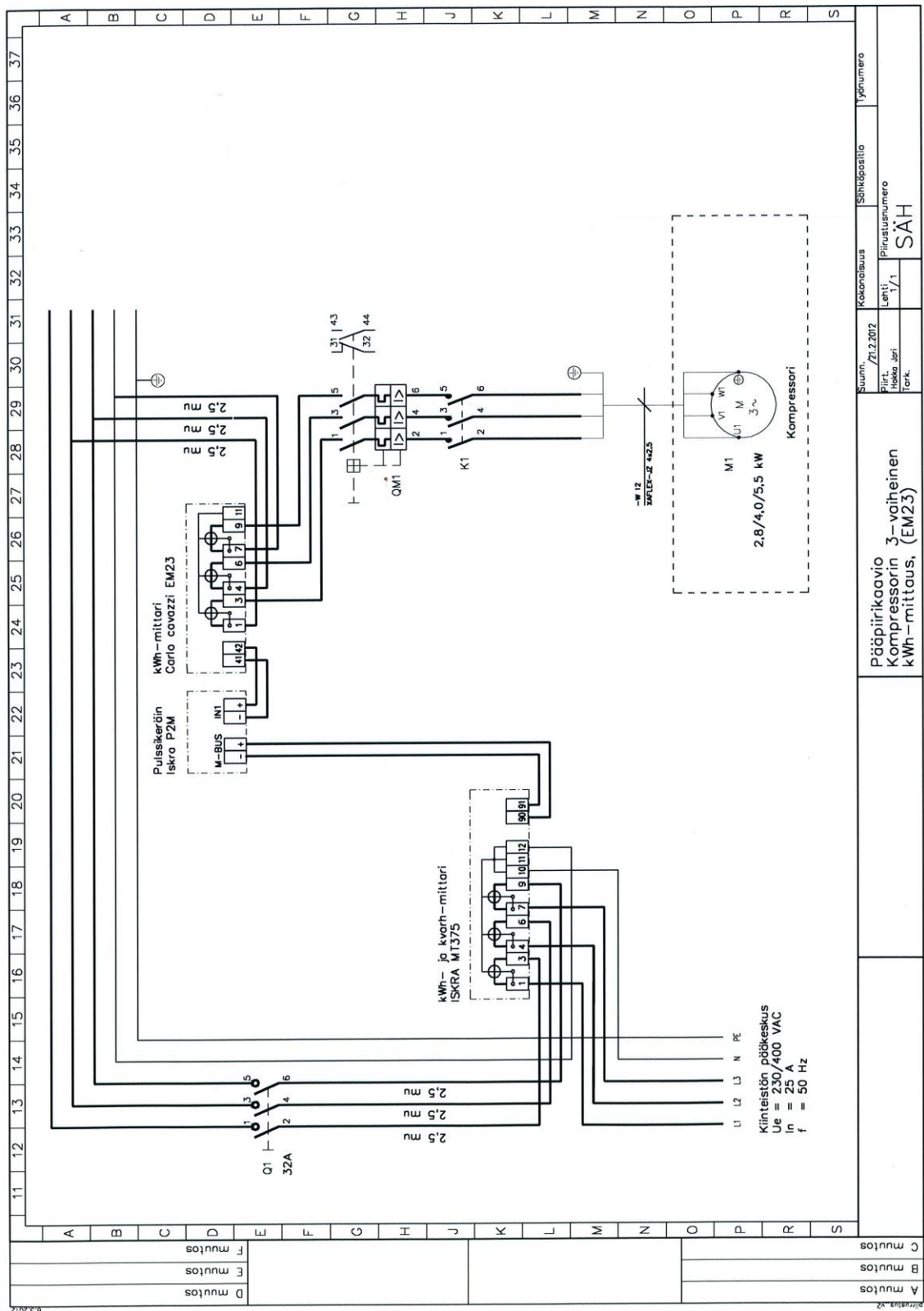
Ympäristöministeriö. Uudet rakentamismääräykset. Tiedote 30.3.2011. Luettu 5.1.2012. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=380376&lan=fi&clan=fi>

LIITTEET

Liite 1. p,h-diagrammi



Liite 2. Kompressorin tehonkulutuksen mittaus



Liite 3. Harjoitustehtäväehdotukset opiskelijoille

1. Maalämpöpumpun eri toiminnalliset osat ja komponentit

- Käy läpi kaikki Lämpöässä T10 maalämpöpumpusta löytyvät eri komponentit ja nimeä ne.
- Selitä eri komponenttien toimintaperiaate ja tärkeimmät toiminnalliset kriteerit teknisine arvoineen.
- Selvitä kaikki sähköiset komponentit ja niiden tehon kulutus.
- Etsi Lämpöässä kompressorin datalehti ja selvitä kyseisen kompressorityypin toimintaperiaate.
- Etsi kompressorin tehokäyrästä, ja arvioi kylmätehoa ja moottorin tehoa lämpötiloissa $+35^{\circ}\text{C}$ ja $+50^{\circ}\text{C}$.
- Mikä kylmäainetta käytetään Lämpöässä T10:ssä? Kerro sen ominaisuuksista.
- Mitkä komponentit ovat mukana alijäähdätyksen ja tulistuksen takia?

2. Kylmähöyryprosessin toiminta

- Piirrä piirrosmerkkejä käyttäen Lämpöässä T10 lämpöpumpun toiminta.
- Laske maalämpöpumpun teoreettinen Carnot-kylmäkerroin ja -lämpökerroin.
- Arvioi alijäähdätyksen ja tulistuksen merkitystä prosessin kannalta.

3. Tilapiirros

- Kerro mikä tilapiirros on ja mihin sitä voidaan käyttää.
- Etsi verkosta Lämpöässä käytetyn kylmäaineen log p-h-diagrammi.
- Lue tarvittavat arvot Lämpöässästä ja Carelista ja tee kaikki tarvittavat mittaukset maalämpöpumpun komponenteista ja piirrä tilapiirros.
- Mittaa ja laske prosessista isentrooppinen hyötysuhde.
- Laske piste h_2 tekemällä tarvittavat mittaukset ja piirrä tilapiirroksen. Isentrooppinen hyötysuhde on 0,67 ja kompressorin lämpöhäviöt 5%.
- Lue Carelista lauhdutin- ja höyrystinpaineet sekä mittaa kompressoriin tulevan höyryn ja lauhduttimesta lähtevän nesteen lämpötilat. Määritä a) lämpökerroin b) suhde $\varepsilon_L / \varepsilon_{CK}$, eli prosessin lämpökertoimen suhde teoreettiseen Carnot-lämpökertoimeen. Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde $\eta_s = 0,70$.
- Määrittele höyrymäärä paisuntaventtiilin jälkeen ja ominaisentalpia tässä pisteessä.
- Laske mikä on ominaistilavuus ja ominaisentalpia, kun kaikki neste on höyrystynyt.
- Laske mikä on ominaisentalpian muutos imuputkessa.
- Määrittele ominaistilavuus juuri ennen kompressoria.
- Laske prosessin massavirta arvioimalla lämpöteho teknisten tietojen mukaan.

- laske kompressorin ottama tilavuusvirta ja teoreettinen puristusteho.

4. Järjestelmästä tehtävät mittaukset

- Tee taulukko, johon merkitset kaikki järjestelmän mittaamat suureet.
- Tee taulukko, johon merkitset kaikki ne manuaalisesti mitattavat suureet, joilla on merkitystä kylmähöyryprosessin kannalta.
- Mittaa ja laske prosessin luovuttama keskimääräinen lämpöteho viikon ajalta.
- Tutustu Vista-kiinteistövalvomoon ja selitä sieltä löytyvät maalämpöpumpputilajärjestelmän komponentit ja niistä tehtävät mittaukset.
- Arvioi COP-arvoa Vista-kiinteistövalvomosta saatavilla tiedoilla.
- Mittaa ja laske prosessin varaajaan siirtämä lämpömäärä viikon ajalta.

5. COP-arvon ja vuosittaisen lämmöntuoton laskenta

- Selvitä miten järjestelmässä olevilla mittauksilla lasketaan COP-arvo. Tee arvio viikon ajalle.
- Kuinka oppimisympäristön laitteilla voidaan arvioida SPF-arvo? Tee suunnitelma, jossa kerrot mitä mitataan ja miten lasketaan.
- Tee kaavio luovutetun lämmön lämpötilan vaikutuksesta teoreettiseen COP-arvoon, kun lämpötila maaperässä on 0 °C

6. Maalämpöpumpun taloudellisuus

- Öljylämmitetyn omakotitalon kulutus on vuodessa 3000 litraa kevyttä polttoöljyä. Öljykattila on 20 vuotta vanha. Vettä talossa kuluu vuodessa 230 m³, josta lämmintä vettä on 40 %. Sähköä kuluu 7000 kWh vuodessa. Talo sijaitsee Jyväskylässä. Tee arvio maalämpöpumpun tuottamasta lämmöstä vuoden aikana .
- Kts. edellinen tehtävä. Mitoita pumpun teho normaalivuoden mukaan, kun osatehon maksimiarvo on 60 % lämmöntarpeen huippuarvosta. Kuinka paljon tällöin lämmitysenergiasta tuotetaan sähkövastuksilla? Mikä on sähkönkulutus maalämpöpumpun asennuksen jälkeen vuodessa?
- Kts. edellinen tehtävä. Tarkista kevyen polttoöljyn litrahinta. Pumpun hinta asennuksineen on 19 000 euroa. Kotitalousvähennys on 2 000 euroa. Tee laskelmat, jossa arvioit kuinka paljon maalämpöpumppu säästää vuodessa. Mikä on takaisinmaksuaika? Tee taulukko, jossa on investointi, käyttökulut, saavutetut säästöt ja korko pääomalle 5 %.